

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. Е. Ломоносов

ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛЫ

Учебно-методическое пособие

для обучающихся по направлениям

11.03.04 – Электроника и нанoeлектроника,

11.03.03 – Конструирование и технология электронных средств,

11.03.01 – Радиотехника,

11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи,

11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы

очной и заочной форм обучения

В трех частях

Часть 1

Севастополь
СевГУ
2023

УДК 621.3315.5/.6:537.31(076)

ББК 32.233/.234я73

Л753

Р е ц е н з е н т:

Н.В. Шевченко - канд. техн. наук, доцент кафедры «Электронная техника»

Ответственный за выпуск:

Ю. П. Михайлюк - канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электронная техника»

Ломоносов, Сергей Евгеньевич

Л753 **Электрорадиоматериалы:** учебно-методическое пособие для обучающихся по направлениям 11.03.04 – Электроника и нанoeлектроника, 11.03.03 – Конструирование и технология электронных средств, 11.03.01 – Радиотехника, 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы очной и заочной форм обучения. – В 3-х частях. Ч. 1 / С. Е. Ломоносов ; Севастопольский государственный университет. – Севастополь : СевГУ, 2023. – 70 с. – Текст : электронный.

Настоящие учебно-методическое пособие предназначено для оказания помощи студентам в изучении теоретического и практического материала дисциплины, подготовке к лабораторным и контрольным занятиям; формировании знаний о классификации электротехнических материалов, основных свойствах электроизоляционных, проводниковых и полупроводниковых материалов; получения общего набора научных знаний о наноматериалах и их перспективах; формирования умения внедрять полученные знания в научно-технической деятельности; использования при эксплуатации и модернизации радиотехнических систем; руководстве при разработке радиоэлектронных средств.

УДК 621.3315.5/.6:537.31(076)

ББК 32.233/.234я73

Учебно-методическое пособие утверждено на заседании кафедры «Электронная техника», протокол № 9 от 27 апреля 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕМА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	4
1.1 Схема заселения электронами оболочек атомов и свойства химических элементов	5
1.2 Зависимость электропроводности вещества от вида химических связей между его атомами	11
1.3 Конструкционные и эксплуатационные свойства электротехнических материалов	15
1.4 Влияние структуры материала на его свойства	16
ТЕМА 2. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	20
2.1 Электропроводность диэлектриков	20
2.2 Поляризация диэлектриков и диэлектрические потери	23
2.3 Диэлектрическая проницаемость материала и угол потерь	26
2.4 Пробой изоляции и электрическая прочность диэлектрика	29
2.5 Электрический пробой газа в однородном поле	30
2.6 Особенности пробоя газа в неоднородном поле	32
2.7 Изоляционные газы и жидкости	33
2.8 Особенности пробоя твёрдой изоляции	36
2.9 Получение и применение полимеров	38
2.10 Неполярные полимеры	40
2.11 Полярные полимеры	41
2.12 Волокнистые изоляционные материалы	44
2.13 Электроизоляционные лаки и компаунды	44
2.14 Композиционные пластмассы и слоистые пластики	46
2.15 Эластомеры	47
2.16 Стёкла	48
2.17 Керамика	50
2.18 Слюда и слюдяные материалы	53
2.19 Асбест и асбестовые материалы	54
2.20 Неорганические диэлектрические плёнки	55
2.21 Нагревостойкость электроизоляционных материалов	55
ТЕМА 3. АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ	56
3.1 Сегнетоэлектрики	56
3.2 Применение сегнетоэлектриков	58
3.3 Электрооптические кристаллы	60
3.4 Пьезоэлектрики	61
3.5 Пироэлектрики	63
3.6 Электреты	64
3.7 Материалы для твёрдотельных лазеров	65
3.8 Жидкие кристаллы	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	68

ТЕМА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Электротехническими называют материалы, применяемые в технике с учетом их свойств по отношению к воздействию на них электрических, магнитных и переменных электромагнитных полей [1].

По поведению в электрическом поле материалы подразделяют на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Проводниками называют материалы, обеспечивающие прохождение электрического тока — электропроводность. Основным электрическим параметром проводников является **удельное объёмное электрическое сопротивление** ρ_v — это сопротивление куба с ребром 1 м при протекании тока от одной грани к противоположной, единица измерения Ом·м. Часто используют обратную величину — **удельную объёмную электропроводность**,

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}, \quad (1.1)$$

единица измерения См/м (сименс на метр). Условно к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho_v < 10^{-5}$ Ом·м. Это металлы и сплавы, углеродные материалы, растворы (электролиты), расплавы, ионизированный газ (плазма), некоторые оксиды и другие химические соединения, а также композиционные материалы [2].

Полупроводниками называют материалы, электропроводностью которых можно управлять путём воздействия электрических и магнитных полей, света, температуры и других энергетических факторов. Удельное сопротивление полупроводников ρ_v находится в пределах от 10^{-5} до 10^8 Ом·м [1].

Полупроводниковые свойства проявляют двенадцать элементов из средней части таблицы Менделеева: В (бор), С (углерод), Si (кремний), Р (фосфор), S (сера), Ge (германий), As (мышьяк), Se (селен), α Sn (альфаолово), Sb (сурьма), Te (теллур), I (йод), а также множество химических соединений, в том числе и органических [2].

Диэлектрическими называют материалы с $\rho_v > 10^8$ Ом·м, которые практически не проводят электрический ток. Под действием электрического поля в них происходит поляризация — смещение связанных электрических зарядов. Способность вещества к поляризации характеризуется значением **относительной диэлектрической проницаемости** ϵ , которая показывает, во сколько раз вещество, поляризуясь, ослабляет внешнее электрическое поле по сравнению с вакуумом; во столько же раз возрастает ёмкость конденсатора, если пространство между его обкладками заполнить веществом [1].

Диэлектрики, применяемые для целей электрической изоляции материалов, называют **пассивными**. Качество изоляции характеризуется пробивным напряжением, а также электрической прочностью, которая представляет собой отношение пробивного напряжения к толщине материала.

Потери при работе изоляции в переменных полях характеризуются **тангенсом угла диэлектрических потерь** $\operatorname{tg} \delta$, который показывает, какая часть

от энергии, запасаемой при поляризации диэлектрика, выделяется в виде тепла [3].

Активными называют диэлектрики, свойствами которых можно управлять, и таким образом использовать их для электрических, электромеханических, электрооптических и других преобразований энергии, а также для запоминания и визуального представления информации [1].

Границы, устанавливаемые между классами материалов по значениям удельного электрического сопротивления, несколько условны. Многие полупроводники при низких температурах ведут себя подобно диэлектрикам, а некоторые проявляют свойство сверхпроводимости. У некоторых диэлектриков при сильном нагревании появляется значительная электропроводность.

По поведению в магнитном поле материалы подразделяют на *сильномагнитные* (магнитные) и *слабوماгнитные* (немагнитные). Более подробная классификация рассматривает 5 групп веществ:

- диамагнетики,
- парамагнетики,
- ферромагнетики,
- антиферромагнетики
- ферримагнетики.

Основным магнитным параметром является **относительная магнитная проницаемость** μ , которая показывает, во сколько раз вещество изменяет магнитное поле по сравнению с вакуумом (если $\mu > 1$, то усиливает, если $\mu < 1$, то ослабляет) [3].

Металлические магнитные материалы проводят электрический ток, поэтому частотный диапазон их использования ограничен устройствами постоянного тока, а также тока промышленной и звуковой частоты. Для использования в высокочастотных и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройствах обработки и передачи информации применяют полупроводниковые и диэлектрические магнитные материалы, которые отличаются малой электропроводностью и малыми потерями энергии на перемангничивание и переполаризацию.

Электромагнитные свойства вещества определяются строением электронных оболочек атомов, из которых оно состоит.

1.1 Схема заселения электронами оболочек атомов и свойства химических элементов

Долгое время для образного представления атомов использовали планетарную модель. В ней электроны обращаются вокруг ядра по строго определённым круговым либо эллиптическим орбитам таким образом, что центробежные силы уравнивают силы электрического притяжения. Одновременно каждый электрон вращается вокруг собственной оси, т. е. имеет спин (англ. *spin* — вращение). Орбиты электронов, имеющих одинаковый уровень энергии, образуют электронную оболочку; в первом слое может поместиться 2 электрона, во втором — 8, в третьем — 18, в четвертом — 32.

Число электронов считают по формуле

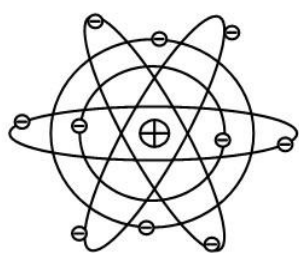
$$N = 2n^2, \quad (1.2)$$

где n — это номер уровня.

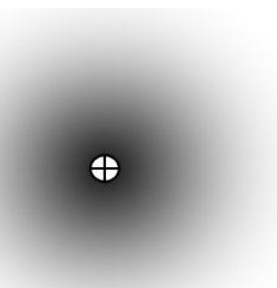
Следовательно, на 5-м энергетическом уровне — 50 электронов, на 6-м — 72 электрона.

Планетарная модель хорошо сочетается с квантовыми представлениями об энергетическом состоянии атомов. Электрон внутри атома может иметь только строго определённые значения энергии, промежуточные энергетические состояния для него запрещены. При получении определённой порции энергии электрон переходит на более высокую разрешённую орбиту, этот процесс называют возбуждением. Возвращаясь на исходную орбиту, электрон отдаёт строго определённую порцию энергии, называемую **квантом**. Эта энергия либо испускается в виде фотона определённого цвета, либо передаётся атомам (ионам, молекулам) кристаллического тела в виде кванта упругих колебаний — фонона определённой частоты. В результате спектр излучения нагретых атомов каждого химического элемента содержит определённый набор линий, это используют при анализе химического состава вещества [4].

Наглядным представлением планетарной модели является система эллиптических орбит, окружающих атомное ядро, и этот красивый рисунок 1.1, а стал эмблемой атомного века, однако сейчас такие картинки не рисуют. В процессе осознания природы электрона обнаружено, что он имеет двойственный корпускулярно-волновой характер, и в некоторых случаях проявляет себя как частица, а в некоторых — как электромагнитная волна. Движущийся электрон не имеет чётких границ и распределён в пространстве, ему соответствует так называемая волна вероятности, для которой квадрат модуля смещения пропорционален плотности вероятности обнаружить электрон в данной точке пространства. В настоящее время атом условно рисуют в виде ядра, окружённого облаком вероятности присутствия электронов (рисунок 1.1, б).



а)



б)

Рисунок 1.1 – Условное изображение оболочки атома:
планетарная (а) и вероятностная (б)

Однако такая «туманная» модель не подчёркивает ни квантового характера изменения энергетического состояния атома, ни различия в свойствах химических элементов, поэтому мы будем продолжать пользоваться понятием

слоя электронной оболочки, представляя его как условную поверхность максимальной вероятности присутствия электронов, имеющих одинаковый уровень энергии [1].

Периодическая система химических элементов Дмитрия Ивановича Менделеева (рис. 1.2.) является иллюстрацией процесса заселения электронных оболочек по мере увеличения заряда ядра и количества электронов.

Период	Ряд	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1	(H)									
2	2	Li 3 Литий	Be 4 Бериллий	B 5 Бор	C 6 Углерод	N 7 Азот	O 8 Кислород	F 9 Фтор	Ne 10 Неон	Обозначение элемента Атомный номер Относительная атомная масса	
3	3	Na 11 Натрий	Mg 12 Магний	Al 13 Алюминий	Si 14 Кремний	P 15 Фосфор	S 16 Сера	Cl 17 Хлор	Ar 18 Аргон		
4	4	K 19 Калий	Ca 20 Кальций	Sc 21 Скандий	Ti 22 Титан	V 23 Ванадий	Cr 24 Хром	Mn 25 Марганец	Fe 26 Железо	Co 27 Кобальт	Ni 28 Никель
4	5	Cu 29 Медь	Zn 30 Цинк	Ga 31 Галлий	Ge 32 Германий	As 33 Мышьяк	Se 34 Селен	Br 35 Бром	Kr 36 Криптон		
5	6	Rb 37 Рубидий	Sr 38 Стронций	Y 39 Иттрий	Zr 40 Цирконий	Nb 41 Ниобий	Mo 42 Молибден	Tc 43 Технеций	Ru 44 Рутений	Rh 45 Родий	Pd 46 Палладий
5	7	Ag 47 Серебро	Cd 48 Кадмий	In 49 Индий	Sn 50 Олово	Sb 51 Сурьма	Te 52 Теллур	I 53 Иод	Xe 54 Ксенон		
6	8	Cs 55 Цезий	Ba 56 Барий	La* 57 Лантан	Hf 72 Гафний	Ta 73 Тантал	W 74 Вольфрам	Re 75 Рений	Os 76 Осмий	Ir 77 Иридий	Pt 78 Платина
6	9	Au 79 Золото	Hg 80 Ртуть	Tl 81 Таллий	Pb 82 Свинец	Bi 83 Висмут	Po 84 Полоний	At 85 Астат	Rn 86 Радон		
7	10	Fr 87 Франций	Ra 88 Радий	Ac** 89 Актиний	Rf 104 Резерфордий	Db 105 Дубний	Sg 106 Сибургий	Bh 107 Борий	Hs 108 Хасгий	Mt 109 Майтнерий	Ds 110 Дармштадтий
7	11	Rg 111 Рентгений	Cn 112 Коперниций	Nh 113 Нихоний	Fl 114 Флеровий	Mc 115 Московский	Lv 116 Ливерморий	Ts 117 Теннессин	Og 118 Оганесон		

58 Ce 140,12 Церий	59 Pr 140,907 Прометий	60 Nd 144,24 Неодим	61 Pm 144,9126 Прометий	62 Sm 150,36 Самарий	63 Eu 151,964 Европий	64 Gd 157,25 Гадолиний	65 Tb 158,925 Тербий	66 Dy 162,50 Диспрозий	67 Ho 164,930 Гольмий	68 Er 167,26 Эрбий	69 Tm 168,934 Тулий	70 Yb 173,04 Иттербий	71 Lu 174,967 Лютеций
90 Th 232,038 Торий	91 Pa 231 Протактиний	92 U 238,03 Уран	93 Np 237 Нептуний	94 Pu 244 Плутоний	95 Am 243 Америций	96 Cm 247 Кюрий	97 Bk 247 Берклий	98 Cf 251 Калифорний	99 Es 252 Эйнштейний	100 Fm 257 Фермий	101 Md 257 Менделеев	102 No 259 Нобелий	103 Lr 260 Лоуренс

Рисунок 1.2 – Периодическая система химических элементов
Дмитрия Ивановича Менделеева

Атом водорода ${}_1\text{H}$ имеет один электрон, который не в состоянии окружить протон одновременно со всех сторон, поэтому атом водорода активно стремится объединиться с другим атомом (водорода или иного элемента), также имеющим неполную оболочку. При объединении получается общая оболочка, так образуются молекулы. У гелия ${}_2\text{He}$ два электрона, его оболочка полностью завершена, и он не проявляет никакой активности. Гелий существует только в атомарном виде и возглавляет группу инертных (благородных) газов. Он конденсируется только при 4,2 К, а затвердевает при 0,5 К (Кельвин). В жидком гелии атомы так слабо связаны между собой, что он обладает сверхтекучестью.

Кельвин (обозначение: К) — единица термодинамической температуры в Международной системе единиц (СИ), одна из семи основных единиц СИ. Предложена в 1848 году. Один кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды (строго определённые значения температуры и давления, при которых вода может одновременно и равновесно существовать в виде трёх фаз — в твёрдом, жидком и газообразном состояниях).

Тройная точка воды — температура 273,16 К (0,01°C) и давление 611,7 Па). Начало шкалы (0 К) совпадает с абсолютным нулём. Пересчёт в градусы Цельсия: $t_C = t_K - 273,15$.

Единица названа в честь английского физика Уильяма Томсона, которому было

пожаловано звание лорд Кельвин Ларгский из Айршира. В свою очередь, это звание пошло от реки Кельвин, протекающей через территорию университета Глазго [4].

Незаполненная оболочка атома ${}_1\text{H}$ побуждает водород к химическим связям, а заполненная оболочка атома гелия ${}_2\text{He}$ обеспечивает ему инертность.

Атом лития ${}_3\text{Li}$ имеет три электрона, два из которых образуют первую оболочку, а третий находится на втором, более высоком разрешённом энергетическом уровне. Литий стремится избавиться от внешнего электрона, это проявление металлических свойств, а литий — очень активный (щелочной) металл. У бериллия ${}_4\text{Be}$ два электрона находятся на верхнем уровне, однако чтобы заселить второй слой этого недостаточно; бериллию легче отдать электроны, чем принять. По мере увеличения количества электронов на втором энергетическом уровне металлические свойства элементов ослабевают, и начинается заселение второго слоя. У атомов бора ${}_5\text{B}$ стремление отдать свои электроны и заполучить чужие выражены в равной мере. У углерода ${}_6\text{C}$ второй слой заселен наполовину, в нём не хватает 4 электронов, поэтому атом углерода стремится объединить свои электроны с электронами других атомов. Атом углерода может образовать 4 связи с другими атомами. Благодаря способности углерода к образованию сложных молекул он является основой жизни [1].

Азот ${}_7\text{N}$ способен образовать 3 связи, что обеспечивает особую прочность и слабую химическую активность молекул. По мере заселения второго слоя возрастают неметаллические свойства элементов, т. е. стремление достроить оболочку за счёт чужих электронов. Кислород ${}_8\text{O}$ активно образует связи почти со всеми элементами. У фтора ${}_9\text{F}$ во втором слое не хватает всего одного электрона, он является самым активным из неметаллов [2].

У неона ${}_{2+8=10}\text{Ne}$ на втором уровне 8 электронов, его вторая оболочка заполнена. Октет электронов делает неон инертным газом с температурой кипения 27,2 К, плавления 24,5 К [2].

Третий слой от натрия ${}_{2+8+1=11}\text{Na}$ до аргона ${}_{2+8+8=18}\text{Ar}$ формируется аналогичным образом; металлические свойства элементов постепенно уменьшаются, а неметаллические — возрастают. У аргона внешняя оболочка представляет собой октет электронов, что делает его инертным газом с температурой кипения 87,5 К, плавления 84 К.

Возрастание заряда ядра и появление последующих электронов делают калий ${}_{19}\text{K}$ щелочным, а кальций ${}_{20}\text{Ca}$ — щелочноземельным металлами.

Начиная со скандия ${}_{21}\text{Sc}$ увеличение числа электронов приводит к возможности уплотнения третьей оболочки и проявлению переменной валентности, что является общим свойством переходных элементов [1].

Переменная валентность — это способность атома химического элемента образовывать определенное число химических связей с другими атомами [5].

Всего переходных элементов 68, часть их получены искусственно, все они металлы, т.о. большинство химических элементов — переходные металлы. Скандий возглавляет семейство из 32 редкоземельных металлов, самое многочисленное, включающее в себя подгруппы из 14 лантанидов и 14 актинидов [2].

Лантаноиды — это химические элементы, которые можно найти в серии лантаноидов блока f в периодической таблице элементов. Лантаноиды нерадиоактивны, за исключением прометия. Поскольку атомные номера лантаноидов находятся в диапазоне от 57 до 71, они также состоят из сравнительно больших атомов. Валентные электроны лантаноидов находятся на 4f орбитали.

Актиноиды — это химические элементы, которые можно найти в серии актиноидов блока f в периодической таблице элементов. Все актиноиды являются радиоактивными элементами из-за их нестабильной природы. У них нет стабильных изотопов. Эти элементы состоят из очень больших атомов. Актиноиды имеют свои валентные электроны на 5f-орбитали. Серия актиноидов состоит из химических элементов, имеющих атомные номера от 89 до 103 [5].

Окисление скандия, титана, ванадия, хрома и марганца возможно до тех пор, пока в третьей оболочке не останется октет из 8 электронов, у марганца ${}_{25}\text{Mn}$ возможная степень окисления доходит до +7. Если внешние электроны этих металлов не участвуют в химических связях, они уплотняют третью оболочку. У железа ${}_{26}\text{Fe}$ и остальных элементов группы железа (кобальта ${}_{27}\text{Co}$ и никеля ${}_{28}\text{Ni}$) способность к окислению меньше, зато эти металлы способны сильно намагничиваться. У меди ${}_{2+8+18+1=29}\text{Cu}$ три оболочки заполнены, а внешний электрон обеспечивает высокую электропроводность. На цинке ${}_{30}\text{Zn}$ переход заканчивается и с галлия ${}_{31}\text{Ga}$ происходит последовательное заселение четвёртой оболочки с уменьшением металлических и увеличением неметаллических свойств. У криптона ${}_{2+8+18+8=36}\text{Kr}$ внешняя оболочка — октет электронов. Он является инертным газом, однако при низких температурах способен соединяться с фтором [1].

Пятый период аналогичен четвёртому, начиная с циркония ${}_{40}\text{Zr}$ проявляется переменная валентность за счёт уплотнения четвёртой оболочки. У рутения ${}_{44}\text{Ru}$ степень окисления может доходить до +8, вместе с тем, благодаря своей инертности он является первым из драгоценных металлов платиновой группы; в пятом периоде за ним следуют родий и палладий. У серебра ${}_{2+8+18+18+1=47}\text{Ag}$ три оболочки заполнены, в четвёртой — 18 электронов и один внешний. Такая конфигурация делает серебро чемпионом по электропроводности. На кадмии ${}_{48}\text{Cd}$ переход заканчивается и с индия ${}_{49}\text{In}$ происходит последовательное заселение пятой оболочки. У ксенона ${}_{2+8+18+18+8=54}\text{Xe}$ три оболочки заполнены, четвёртая состоит из 18 электронов, внешняя пятая — октет. Ксенон считается инертным газом, хотя некоторые его соединения с фтором устойчивы до температуры 180 °C [1].

Шестой период начинается с цезия и бария, переходит к лантану, а затем, начиная с церия ${}_{58}\text{Ce}$ уплотняется 4я оболочка, на которой может поместиться 32 электрона. В процессе уплотнения четвёртой оболочки образуется группа из 14 редкоземельных металлов, близких по свойствам и имеющих общее название «лантаниды». Здесь возможна конкуренция между 4 и 5 оболочками, благодаря чему редкоземельные металлы обладают особыми свойствами в отношении магнетизма, люминесценции и сверхпроводимости. После заполнения 4й оболочки, начиная с гафния ${}_{72}\text{Hf}$, происходит заселение пятой до тех пор, пока у золота ${}_{79}\text{Au}$ на ней не окажется 18 электронов.

На ртути ^{80}Hg переход заканчивается и происходит заселение шестой оболочки, сопровождаемое соответствующим изменением химических свойств, однако после висмута ^{83}Bi все элементы радиоактивны и распадаются из-за нестабильности ядра. У радона четыре оболочки заполнены $2+8+18+32+18+8=86$ Rn, пятая состоит из 18 электронов, а внешняя шестая — октет. Этот газ тоже считается инертным, хотя образует соединения с фтором состава RnF_n , где $n = 4, 6, 2$.

Анализируя заполнение оболочек неона, аргона, криптона, ксенона и радона, можно заметить, что инертность этих газов обеспечена 8-электронной внешней оболочкой, причём внутренние оболочки, могут быть незаполненными, но содержать 18 электронов. Если в атомах инертных газов есть 18-электронные оболочки, то сверхактивный фтор способен «пожизниться» их электронами, достраивая свой октет. Очевидно, что причина устойчивости электронной оболочки заключается в её объёмной симметрии. Наибольшей симметрией обладает сфера, однако следует учесть, что оболочка образуется отдельными электронами, т. е. за её модель можно принять многогранник, в котором каждый электрон обеспечивает своим присутствием одну грань. Особая устойчивость оболочки проявляется в том случае, если её поверхность распределена между электронами поровну, т. е. многогранник должен быть правильным [1]. Правильных многогранников всего пять, они изображены на рисунке 1.2.

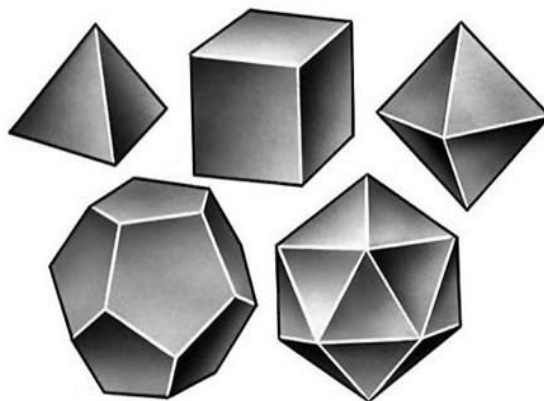


Рисунок 1.2 – Правильные многогранники:

а — тетраэдр; б — куб; в — октаэдр; г — додекаэдр; д — икосаэдр

Несимметрия незаполненных внутренних оболочек переходных металлов является причиной магнетизма. Первой теорией магнетизма была гипотеза Ампера, который считал его проявлением внутримолекулярных токов.

Ампер предположил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи (молекулярные токи). Каждый такой ток обладает магнитным моментом и создает в окружающем пространстве магнитное поле. В отсутствие внешнего поля молекулярные токи ориентированы беспорядочным образом, вследствие чего обусловленное ими результирующее поле равно нулю. В силу хаотической ориентации магнитных моментов отдельных молекул суммарный магнитный момент тела также равен нулю. Под действием поля магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию в одном направлении, вследствие чего магнетик намагничивается — его суммарный магнитный момент становится отличным от нуля [6].

Изучение молекул и кристаллов показало, что они состоят из атомов. Таким образом, речь должна идти о внутриатомных движениях электронов, которые можно рассматривать как замкнутые электрические токи, при этом каждый электрон создаёт собственное магнитное поле. В заполненной электронной оболочке магнитные поля отдельных электронов компенсируют друг друга. Электроны внешнего слоя (валентные) компенсируют свои магнитные поля за счёт электронов других атомов, в результате большинство веществ практически немагнитны. Магнетизм является отклонением от этого принципа компенсации. Магнитные атомы представляют собой очень маленькие, но сильные магниты, в которых магнитные поля отдельных электронов не компенсируются, а наоборот, складываются. Это возможно, когда электронные оболочки не заполнены, что характерно для переходных элементов. Сильные магнитные свойства проявляют железо, кобальт и никель, а также (при пониженных температурах) пять редкоземельных металлов — гадолиний, диспрозий, гольмий, эрбий и тербий [1].

Слово «редкоземельный» не означает, что это редкие металлы. Напротив, их можно обнаружить даже чаще, чем медь, свинец, олово или же золото. Металлы получили такое название, поскольку крайне редко встречаются в земной коре в концентрированном (а не рассеянном) виде, пригодном для использования в промышленных масштабах. Иначе говоря, коммерчески выгодном [7].

Перечисленные элементы способны проявлять магнитные свойства не только сами по себе, но и в соединениях, в том числе с немагнитными элементами. Однако присутствие атомов перечисленных металлов не является обязательным условием магнетизма. Известны сплавы Гейслера, элементы которых по отдельности не проявляют магнитных свойств, однако, в процессе соединения в виде сплава, у некоторых из них происходит перестройка оболочек, в результате которой весь сплав становится магнитным.

1.2 Зависимость электропроводности вещества от вида химических связей между его атомами

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение носителей зарядов. Электротехника использует вещества в твёрдом, жидком и газообразном состоянии.

В жидкостях заряд переносят ионы (греч. *ion* – идущий).

Атомы вещества состоят из положительно заряженных протонов, отрицательно заряженных электронов и нейтронов, единственной значимой характеристикой которых является масса. Сами атомы не несут никакого заряда, потому что число протонов и электронов одинаково, и их заряды уравнивают друг друга. В случае если баланс между протонами и электронами нарушается, принято говорить о появлении **иона**.

Положительно заряженные ионы (**катионы**) возникают, когда электронов становится меньше, чем протонов. Отрицательные (**анионы**) — наоборот, когда количество электронов превышает количество протонов. Процесс превращения атома в ион называется **ионизацией**. Причинами ионизации вещества могут быть высокие температуры, давление или электромагнитное излучение [8].

Таким образом, протекание постоянного электрического тока по жидкости сопровождается переносом вещества.

В ионизированном газе — плазме — двигаться могут как ионы, так и свободные электроны. В твёрдом веществе ионы связаны, электрические заряды переносятся электронами [1].

В зависимости от способа, которым электроны обеспечили связи между атомами, возможны два механизма их перемещения под действием электрического поля:

- электроны свободны, и могут продвигаться сквозь вещество, теряя, однако, энергию при столкновениях с атомами или ионами;
- электроны связаны и могут переходить из оболочки одного атома в оболочку другого, соседнего, если там есть место.

Оба эти процесса регламентированы квантовой теорией, однако в процессе объединения атомов в молекулы или кристаллы происходит перегруппировка их электронных оболочек, разрешённые уровни смещаются и расщепляются.

Квантовая теория — теория, основы которой были заложены в 1900 физиком Максом Планком. Согласно этой теории, атомы всегда излучают или принимают лучевую энергию только порциями, прерывно, а именно определенными квантами (кванты энергии), величина энергии которых равна частоте колебаний (скорость света, деленная на длину волны) соответствующего вида излучения, умноженной на планковский квант действия. Квантовая теория была положена в основу квантовой теории света (корпускулярная теория света), по которой свет также состоит из квантов, движущихся со скоростью света (световые кванты, фотоны) [9].

Из-за взаимодействия атомов друг с другом число разрешённых уровней многократно возрастает, а промежутки между ними уменьшаются настолько, что расщеплённый уровень, размываясь, превращается в зону. В твердом веществе, в отличие от одиночного атома, уровень энергии электрона должен быть в пределах зоны разрешённых энергетических состояний.

Рассмотрим, как влияет вид химической связи между атомами вещества на его электропроводность с точки зрения разрешённых и запрещённых энергетических состояний электрона [1].

У атомов металлов один или несколько внешних электронов не могут образовать оболочку. Они стремятся избавиться от этих электронов, отдавая их в «коллективное пользование», и превращаясь в идеальные положительно заряженные шарики-ионы. Металлический предмет можно представить, как совокупность положительно заряженных шариков-ионов, в промежутках между которыми находятся отрицательно заряженные электроны, скрепляя их кулоновскими силами электростатического притяжения [2].

Закон Кулона — это закон, описывающий силы взаимодействия между точечными электрическими зарядами.

Был открыт Шарлем Кулоном в 1785 г. Проведя большое количество опытов с металлическими шариками, Шарль Кулон дал такую формулировку закона: «Модуль силы взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними». Иначе: «Два точечных заряда в вакууме действуют друг на друга с силами, которые пропорциональны произведению модулей этих зарядов, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними и направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды». Эти силы называются электростатическими (кулоновскими) [10].

Такую связь называют **металлической**. При ней каждый из внешних валентных электронов в равной мере принадлежит окружающим его ионам и, под действием малейшего электрического напряжения, легко «протекает» между ними, обеспечивая перенос электрического заряда и энергии. Эта простая модель наглядно объясняет хорошую электропроводность, теплопроводность и ковкость металлов, подчёркивая свободу перемещения электронов по металлу, используют термин «электронный газ» [2].

Диаграмма энергетических состояний электронов в проводнике или, короче, энергетическая диаграмма проводника, показана на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Расщепление в проводнике разрешённых энергетических уровней на зоны

Слева показаны разрешённые энергетические состояния одиночного атома. При образовании межатомных связей основные разрешённые уровни энергии расщепляясь образуют зону заполненных энергетических уровней валентных электронов, или валентную зону. Разрешённые уровни энергии возбуждённых электронов также расщепляются, перекрываются, и образуют общую зону разрешённых энергетических состояний, называемую зоной свободной проводимости. Граница между зоной проводимости и валентной зоной у проводников отсутствует, эти зоны частично перекрываются, поэтому валентные электроны могут легко передвигаться по металлу, перенося заряд и энергию.

У **неметаллов** для завершения внешней оболочки не хватает одного или нескольких электронов. Эта недостача компенсируется за счёт привлечения электронов из оболочек соседних атомов и создания устойчивых пар, принадлежащих обоим соседям. Такую связь называют ковалентной [2].

Элементы, отдающие электроны с внешнего энергетического уровня, называют **металлами** — это, как правило, твердые вещества (особняком стоит ртуть, которая при нормальных условиях является жидкостью).

Элементы, принимающие электроны на внешний энергетический уровень, являются **неметаллами**. Они находятся в различных агрегатных состояниях. Кислород и азот — это газы, бром — жидкость, а к твердым веществам относятся, например, мышьяк, углерод и бор [11].

При образовании пары энергия валентных электронов снижается так резко, что у неметалла, в промежутке между зоной проводимости и валентной зоной, появляется зона запрещённых энергетических состояний, или запретная зона шириной ΔW (рисунок 1.4). Если запретная зона не очень широка, то вещества можно использовать в качестве полупроводника. При ширине запретной зоны более 6 эВ — это диэлектрики [1].



Рисунок 1.4 — Запретная зона на энергетической диаграмме полупроводников и диэлектриков

Ковалентная связь соединяет между собой атомы органических молекул.

Вместе с тем она может наблюдаться и у неорганических веществ, если их кристаллические решётки состоят из атомов [3].

Ковалентная связь — химическая связь, которая предполагает совместное использование электронных пар между атомами. Эти электронные пары известны как *общие пары* или *пары связей*, а стабильный баланс сил притяжения и отталкивания между атомами, когда они разделяют электроны, известен как ковалентная связь [12]

Примерами подобных веществ являются алмаз, кремний, германий, карбид кремния и другие полупроводниковые кристаллы, твёрдость и высокая температура плавления которых являются примерами прочности ковалентной связи. Если ковалентная связь соединяет одинаковые атомы, то центр отрицательного электрического заряда объединённой электронной оболочки находится точно посередине между ядрами и совпадает с центром их положительного заряда. Такую связь называют ковалентной неполярной. Если ковалентная связь соединяет разные атомы, то электронная оболочка оказывается стянутой в сторону одного из них, здесь образуется отрицательный полюс. При этом второе ядро частично оголяется, здесь образуется положительный полюс. Молекулы такого вещества представляют собой электрические диполи, а связь называют **ковалентной полярной** [2].

При соединении атомов металлов с атомами неметаллов предоставляется прекрасная возможность одновременного превращения в шарики как тех, так и других, путём перехода электронов от металлов к неметаллам. При этом атомы металла превращаются в положительные ионы, а атомы неметалла — в отрицательные. Разноименно заряженные частицы притягиваются, образуя ионные кристаллы. Такая связь называется ионной и является предельным случаем ковалентной полярной связи. Заполняя электронную оболочку

неметалла, валентный электрон, ранее принадлежащий металлу, резко уменьшает свою энергию [3].

Ионные кристаллы представляют собой кристаллы, состоящие из ионов, связанных между собой электростатическим притяжением. Примерами таких кристаллов являются галогениды щелочных металлов, в том числе фторид калия, хлорид калия, бромид калия, иодид калия, фторид натрия и другие комбинации ионов натрия, цезия, рубидия и лития с ионами фтора, брома, хлора и иода.

Ионные кристаллы характеризуются сильным поглощением инфракрасного излучения, и у них есть плоскости, вдоль которых они легко расщепляются. Точное расположение ионов в ионной решётке зависит от размера ионов в твердом состоянии.

Ионные кристаллы обычно имеют высокую температуру плавления и хорошо растворимы в полярных растворителях (в частности в воде) [8].

Верхняя граница валентной зоны резко опускается, на энергетической диаграмме вещества появляется широкая запретная зона, поэтому ионные кристаллы — диэлектрики [2].

1.3 Конструкционные и эксплуатационные свойства электротехнических материалов

В процессе изготовления и монтажа электрооборудования и электронной аппаратуры материалы подвергаются механическим, тепловым, химическим и другим воздействиям технологического оборудования. Во время эксплуатации электрических устройств материалы подвергаются совместному воздействию механических усилий, тепла и других факторов окружающей среды. Устойчивость материалов к этим воздействиям обеспечивает длительную и безаварийную эксплуатацию электрооборудования. Для оценки конструкционных и эксплуатационных свойств электротехнических материалов используют физические и химические характеристики.

Значения пределов механической прочности твёрдых материалов при статических нагрузках (сжатии, растяжении, изгибе, кручении) выражаются в паскалях (мегапаскалях), $1\text{Па} = 1\text{Н/м}^2$. Для оценки *пластичности* материала используют значение относительного удлинения при разрыве $\Delta l/l$ в процентах. *Хрупкость* материала оценивают по стойкости к динамическим нагрузкам (ударам), здесь применяют понятие «ударная вязкость», единица измерения — джоуль на квадратный метр (Дж/м^2). *Кинематическую вязкость* жидкостей измеряют в квадратных метрах на секунду ($\text{м}^2/\text{с}$), а *динамическую* — в паскалях, умноженных на секунду ($\text{Па}\cdot\text{с}$).

Тепловые свойства материалов характеризуются теплоёмкостью, теплопроводностью, температурными коэффициентами линейного и объёмного расширения, а также значениями температуры размягчения (застывания), плавления и кипения. Для твёрдой изоляции очень важна оценка нагревостойкости и холодостойкости. Для горючих изоляционных жидкостей важнейшими тепловыми характеристиками являются температура вспышки паров и температура воспламенения [6].

Для оценки устойчивости изоляции к воздействию воды пользуются понятиями «влажность», «влагопроницаемость». В ряде случаев следует позаботиться об устойчивости материалов к коррозии, особенно при

совместном воздействии воды и химически активных веществ (кислотные дожди, морская вода), а также к воздействию плесени, грибов, термитов (тропикостойкость).

Важна также стойкость изоляции к воздействию лучей солнечного света и других ионизирующих излучений.

Ионизирующее излучение — это вид излучения энергии такой мощности, что оно способно отделять электроны от атомов или молекул, тем самым вызывая изменения на атомном уровне при взаимодействии с веществом, включая живые организмы. Такие изменения обычно сопровождаются образованием ионов (электрически заряженных атомов или молекул) — отсюда и возник термин «ионизирующее» излучение.

Неионизирующее излучение — это излучение более низкой энергии, которое не обладает достаточной мощностью, чтобы отделить электроны от атомов или молекул, находящихся в веществе или в живых организмах. Однако его энергия может заставить эти молекулы вибрировать и таким образом выделять тепло. Например, именно так работают микроволновые печи [13].

1.4 Влияние структуры материала на его свойства

Твёрдые электроматериалы могут иметь различную структуру:

- кристаллическую,
- аморфную,
- композиционную.

Кристаллы характеризуются строгим повторением одинаковых пространственных ячеек и периодичностью электростатического поля. **Кристаллы** — это пример чистоты и порядка в мире атомов, они различаются формой пространственных решёток и обладают различными видами симметрии. Выделяют 6 кристаллических систем (рисунок 1.5) [6]:

- кубическая,
- моноклиная,
- тетрагональная,
- триклинная,
- ромбическая,
- гексагональная.

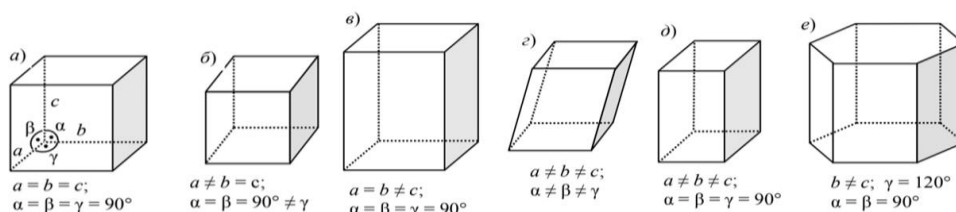


Рисунок 1.5 – Формы кристаллов: а — кубическая; б — моноклиная; в — тетрагональная; г — триклинная; д — ромбическая; е — гексагональная

Атомы могут находиться в вершинах, в центрах граней, а также в центре объёмного тела. Образование каким-либо элементом или соединением определённой пространственной формы кристаллической решётки в основном зависит от размеров атомов и их валентности.

Кристаллическая структура возможна при любом виде химической связи — ковалентной, ионной, металлической. У некоторых веществ, состоящих из ковалентных молекул, также можно заметить кристаллическую структуру. Слабую связь, возникающую между соседними молекулами при согласованном (синхронном) движении пар валентных электронов называют молекулярной или связью Ван-дер-Ваальса. Молекулярные кристаллы отличаются малой прочностью и низкой температурой плавления (у парафина $t_{пл}=50...52^{\circ}\text{C}$).

Кристаллические тела могут быть в виде отдельных крупных **монокристаллов** или состоять из совокупности большого числа мелких зёрен — **кристаллитов**.

Монокристаллы обладают анизотропией (от греч. *ánisos* — неравный и *trópos* — направление) — неодинаковость физических (физико-химических) свойств среды (например, электропроводности, теплопроводности и др). Их реакции на электрические, магнитные, световые, механические и другие воздействия зависят от направления этих воздействий относительно кристаллографических плоскостей и осей кристалла [6].

Поликристаллические вещества обычно изотропны.

Поликристаллическое вещество — твердое, состоящее из разориентированных друг относительно друга, имеющих одну и ту же кристаллическую структуру зёрен (кристаллитов), вещество [14]

В пределах каждого зерна атомы расположены периодически, но при переходе от одного зерна к другому, на границах раздела, регулярное расположение частиц нарушается и, в общем случае, свойства вещества одинаковы во всех направлениях. Однако с помощью специальной обработки — **текстурирования** — поликристаллическому материалу может быть придана **текстура** — преимущественная ориентация составляющих их кристаллитов в одном направлении. Текстурованные материалы анизотропны (это зависимость свойств материала от направления).

Материал считается *изотропным*, когда его свойства во всех направлениях одинаковые. Если же с изменением направления свойства материала изменяются, материал считается *анизотропным* и по некоторым свойствам приближаются к *монокристаллическим*.

Некоторые твёрдые вещества обладают способностью образовывать не одну, а две и более кристаллические структуры, устойчивые при различных температурах и давлениях. Такое свойство материалов называют *полиморфизмом*, а кристаллические структуры — *полиморфными формами* или *аллотропными модификациями вещества*. Модификацию, устойчивую при наиболее низкой температуре, принято обозначать греческой буквой α . Модификации, устойчивые при более высоких температурах, обозначают буквами β , γ и т. д.

Классическим примером полиморфизма является превращение на морозе белого олова ($\beta\text{-Sn}$) в серое ($\alpha\text{-Sn}$), известное в технике как «оловянная чума». Особый интерес представляет *полиморфизм углерода* — существование его в виде алмаза или графита. В обычных условиях более устойчивой модификацией является графит, однако при повышении давления устойчивость алмаза растёт, а графита падает. Если при высоком давлении повысить

температуру, чтобы увеличить подвижность атомов, то графит можно перевести в алмаз. Кроме этого, атомы углерода могут образовывать [2]:

- нити — **карбины**,
- плоские плёнки — **графены**,
- шаровые структуры — **фуллерены**,
- углеродные **нанотрубки**.

Особая чистота и правильное строение кристаллов обеспечивают наилучшие условия для проявления характерных свойств вещества, будь то проводник, полупроводник, диэлектрик либо магнитный материал. Однако в процессе затвердевания вещества атомы не всегда имеют благоприятную возможность располагаться упорядоченно, особенно, если охлаждение происходит быстро. Твёрдые тела, которые характеризуются случайным, хаотичным расположением частиц, называют **аморфными**. В отличие от кристаллов аморфные тела изотропны по свойствам, не имеют определённой температуры плавления и при нагреве постепенно размягчаются, теряя прочность [3].

Наглядным примером аморфных веществ могут служить стёкла и многие пластики. Несмотря на отсутствие периодичности в строении в стёклах можно наблюдать определённый ближний порядок, т. е. закономерное расположение ближайших соседей относительно каждого атома. При нагреве с последующим медленным остыванием (отжиге) может происходить «расстекловывание» материала, т. е. переход из аморфного в более устойчивое кристаллическое состояние. Такой материал называют **ситаллом**.

Наноситал, или ситалл, — это уникальный материал, состоящий из главных компонентов натуральных ювелирных камней — SiO_2 и Al_2O_3 , с той лишь разницей, что синтезирован он в лабораторных условиях. Учёные складывают различные комбинации из этих оксидов. Получается своеобразный ювелирный «пазл», повторяющий натуральные минералы по всем химико-физическим параметрам.

По своим свойствам ситалл наиболее близок к природному топазу. Кристальная прозрачность и широкий спектр возможных цветов дают беспрецедентную возможность воссоздавать практически все цветные полудрагоценные и даже драгоценные камни. По сути, ситаллы — это высококачественные аналоги рубинов, гранатов, сапфиров и других дорогостоящих природных минералов.

Отдельно стоит отметить оптические показатели ситалла. В отличие от других неприродных вставок, блеск и цвет ситалла безупречен даже в крупных образцах [15].

Композиционные материалы объединяют компоненты различной структуры, используя их достоинства и компенсируя недостатки. В них сочетаются механическая прочность, эластичность, тепловая или химическая стойкость одних составляющих с высокими электрическими и/или магнитными характеристиками других. Примером удачной композиции является конденсаторная керамика, представляющая собой смесь мелких кристаллов, соединённых аморфным стекловидным связующим. Ещё пример — пропитанная волокнистая изоляция, которая сочетает прочность волокон и высокие диэлектрические характеристики пропитки. Это справедливо и для текстолита (стеклотекстолита), в котором связующий материал полимеризован,

т. е. переведен в твёрдое состояние. В меднографитных щётках сочетаются нагревостойкость и неприхватываемость графита с электропроводностью меди. В магнитодиэлектриках сочетаются магнитные свойства металлических порошков и изоляционные свойства связующей смолы. Соединением мелких кристаллов полупроводника карбида кремния с помощью связующего стекла получают **вилит** — материал, способный под действием импульса напряжения переходить в проводящее состояние, а после окончания импульса восстанавливать свои изоляционные свойства [1].

Применение вилита. Вентильный разрядник состоит из двух основных компонентов: многократного искрового промежутка (состоящего из нескольких однократных) и рабочего резистора (состоящего из последовательного набора вилитовых дисков). Во время перенапряжения многократный искровой промежуток пробивается.

Вилит обладает особым свойством — его вольт-амперная характеристика нелинейна — падает с увеличением значения силы тока. Это свойство позволяет пропустить больший ток при меньшем падении напряжения.

Работа разрядника происходит в следующем порядке. При появлении перенапряжения пробиваются три последовательно включенных блока искровых промежутков. Импульс тока при этом через рабочие резисторы замыкается на землю. Возникший сопровождающий ток ограничивается рабочими резисторами, которые создают условия для гашения дуги сопровождающего тока [16].

Сведения о структуре электротехнического материала не менее важны, чем знание его химического состава. В электротехнике и электронике используются достоинства как кристаллических, так и аморфных материалов, однако создание композиций является наиболее интересным и перспективным направлением материаловедения.

ТЕМА 2. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы окружают и отделяют друг от друга токоведущие части электрических устройств, элементы схемы или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Изоляция обкладок конденсаторов позволяет получать требуемые значения электрической ёмкости [2].

Для изоляции применяют газы, жидкости и твёрдые вещества. По химическому составу электроизоляционные материалы подразделяют:

- на органические,
- элементоорганические
- неорганические.

Твёрдые материалы классифицируют на основе особенностей их строения:

- полимеры и эластомеры (каучуки),
- волокна (пропитанные),
- лаки и компаунды,
- стёкла,
- кристаллы и плёнки,
- композиции диэлектриков волокнистого и кристаллического строения с аморфным связующим.

Под действием электрического поля диэлектрик поляризуется, кроме того, через него протекает небольшой ток сквозной проводимости. От этого тока, но в основном от потерь энергии при замедленных видах поляризации, диэлектрик нагревается, что может привести к пробое. Пробой возможен также в результате ударной ионизации и электрохимического старения.

2.1 Электропроводность диэлектриков

В диэлектрике различают токи сквозной проводимости и токи смещения связанных зарядов (при замедленных видах поляризации их называют токами абсорбции, от лат. *absorbeo* — поглощаю). Сумма токов сквозной проводимости и абсорбции называется **током утечки**.

Ток сквозной проводимости. Составляющая тока, которая не изменяется со временем приложения постоянного напряжения, представляет собой стационарный поток электрически заряженных частиц, разряжающихся на электродах, и называется током сквозной проводимости.

Ток смещения. Величина, прямо пропорциональная скорости изменения электрической индукции

Абсорбционный ток. Ток смещения различных видов замедленной поляризации. Абсорбционные токи при постоянном напряжении протекают в диэлектрике до момента установления равновесного состояния, изменяя свое направление при включении и выключении напряжения. При переменном напряжении абсорбционные токи протекают в течение всего времени нахождения диэлектрика в электрическом поле [17].

Электропроводность диэлектрика характеризуется только током сквозной проводимости. Для исключения токов абсорбции её измеряют при постоянном напряжении через 1 минуту после его подачи (за это время токи абсорбции спадают практически до нуля).

Электропроводность диэлектриков возрастает при нагреве и повышении влажности. У твёрдых материалов различают *объёмную* и *поверхностную электропроводность*. Для численной оценки качества изоляционных материалов можно использовать значения его удельной объёмной электрической проводимости — объёмной γ_V , См/м (сименс, делённый на метр), и поверхностной γ_S , См. На практике чаще используют обратные величины — удельные объёмное ρ_V и поверхностное ρ_S электрические сопротивления [1].

Удельное объёмное электрическое сопротивление ρ_V , Ом·м (ом, умноженный на метр), численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно выделенного из исследуемого материала, если ток проходит от одной грани этого куба к противоположной.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_S , Ом, численно равно сопротивлению квадрата любых размеров, мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит от одной стороны этого квадрата к противоположной.

При длительной работе под напряжением сквозной ток через твёрдые или жидкие диэлектрики с течением времени может изменяться — уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение сквозного тока со временем говорит о том, что электропроводность материала обусловлена ионами посторонних примесей, она уменьшается за счёт электрической очистки образца. Увеличение тока со временем свидетельствует об участии в нём зарядов, которые являются структурными элементами самого материала и о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения, способном постепенно привести к разрушению — пробоем диэлектрика [1].

Электропроводность газов при небольших значениях напряжённости электрического поля пренебрежимо мала. Поэтому воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик, до тех пор, пока не создадутся условия для ударной ионизации.

Ударная ионизация — физическое явление в полупроводниках, при котором увеличивается число ионов и электронов в промежутке за счет столкновения электронов с повышенной энергией с нейтральными молекулами. При каждом акте ионизации затрачивается некоторая энергия ионизации, значения которой зависят от типа молекул вещества [8].

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В неполярных жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги (от лат. *dissociatio* — разъединение). Очистка неполярных жидких диэлектриков от примесей заметно повышает их сопротивление. В полярных жидкостях (это жидкости с большим дипольным моментом, способные растворять полярные соединения) электропроводность зависит не только от примесей, иногда она вызывается диссоциацией молекул самой жидкости.

Полярные растворители — это жидкости с большим дипольным моментом. Это жидкости, способные растворять полярные соединения. Это потому, что и полярные растворители, и полярные соединения имеют дипольные моменты и имеют противоположно заряженные фрагменты в одном и том же химическом соединении.

Неполярные растворители — это жидкости, не имеющие дипольного

момента. Следовательно, эти растворители не содержат частичных положительных или отрицательных зарядов. По этой причине эти растворители не могут растворять полярные соединения, потому что нет противоположных зарядов, притягивающих полярное соединение. Некоторые примеры неполярных растворителей включают пентан, гексан, бензол, толуол и т. д. [18]

С увеличением температуры возрастает степень диссоциации и подвижность ионов, а, следовательно, и электропроводность. Полярные жидкости по сравнению с неполярными всегда имеют повышенную проводимость, чем больше диэлектрическая проницаемость, тем выше проводимость. Сильнополярные жидкости (отличаются настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью) отличаются настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью [1].

Электропроводность твёрдых тел обусловлена как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а в сильных полях — также движением электронов. Собственная электропроводность твёрдых тел, её зависимость от температуры определяются структурой вещества и его составом. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей удельной проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. В анизотропных кристаллах удельная проводимость неодинакова по разным его осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно, в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном этой оси. В кристаллических телах с молекулярной решёткой (сера, алмаз) проводимость мала и определяется примесями. Проводимость твёрдых пористых диэлектриков значительно увеличивается при наличии в них влаги. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но под воздействием влажной среды сопротивление вновь уменьшается. Для уменьшения гигроскопичности (поглощения влаги) и влагопроницаемости пористые изоляционные материалы подвергают пропитке [2].

Поверхностная электропроводность твёрдых диэлектриков обусловлена наличием влаги, загрязнением и различными дефектами поверхности диэлектрика. Вода обладает значительной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную электропроводность, которая определяется в основном толщиной этого слоя. Однако поскольку сопротивление адсорбированной плёнки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как характеристику самого диэлектрика.

Наличие загрязнения относительно мало сказывается на поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков (от гидро... и греч. *phobos* — страх, боязнь). Это неполярные диэлектрики, чистая поверхность которых неспособна смачиваться водой. Однако загрязнения сильно влияют на проводимость гидрофильных диэлектриков. (от гидро... и греч. *phileo* — люблю). К ним относят ионные и полярные диэлектрики со смачиваемой поверхностью, особенно если они частично растворимы в воде. Под действием воды на

поверхности таких диэлектриков образуется плёнка электролита. Высокой поверхностной проводимостью обладают также объёмно-пористые материалы, в них процесс поглощения влаги в глубь материала стимулирует образование плёнки на его поверхности [2].

С целью уменьшения поверхностной электропроводности материала применяют различные приёмы очистки его поверхности — промывку спиртом и водой, кипячение в дистиллированной воде. Для сохранения поверхностного сопротивления изделий из керамики и стёкол в условиях высокой влажности, их покрывают плёнками гидрофобных (водоотталкивающих) кремнийорганических лаков.

При постоянном напряжении качество изоляционного материала характеризуется значениями удельных объёмного ρ_v и поверхностного ρ_s сопротивлений. Потери энергии, вызванные протеканием малых постоянных токов сквозной проводимости, невелики.

2.2 Поляризация диэлектриков и диэлектрические потери

Поляризацией вещества называют смещение связанных зарядов [6].

Поляризация возникает под действием внешнего электрического поля, однако у сегнетоэлектриков наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризация, а пьезоэлектрики могут поляризоваться под действием механических напряжений.

Различают несколько механизмов поляризации, для их моделей применяют резисторы и конденсаторы как показано на рисунке 2.1, а.

Элементы, соответствующие необязательным механизмам поляризации и потерь, показаны пунктиром.

Ёмкость C_0 соответствует конденсатору, между обкладками которого вакуум. Резистор $R_{пр}$ соответствует потерям энергии от токов сквозной проводимости (эти потери не зависят от частоты приложенного напряжения, а с ростом температуры возрастают по экспоненциальному закону).

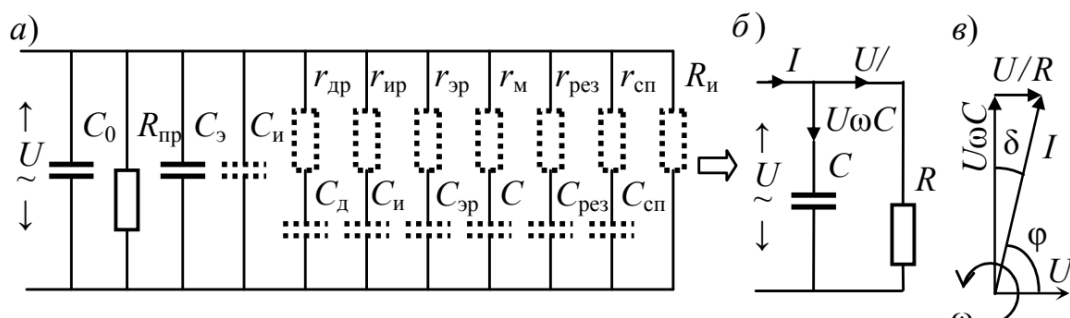


Рисунок 2.1 – Поляризация диэлектрика:

а — моделирование механизмов поляризации и потерь;

б — схема замещения; в — векторная диаграмма

Электронная поляризация (C_e) представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Происходит мгновенно (за время около 10^{-15} с) и без потери энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков. Значение диэлектрической проницаемости вещества с чисто электронной поляризацией, численно равно квадрату показателя преломления света [3].

Ионная поляризация (C_u) характерна для твёрдых тел с ионным строением и обусловлена упругим смещением связанных ионов на расстояния, меньшие периода решётки. Происходит быстро (за время около 10^{-13} с) и без потери энергии.

Дипольно-релаксационная поляризация ($C_{др}, r_{др}$) свойственна полярным жидкостям и представляет собой замедленный поворот дипольных молекул в направлении электрического поля, что требует преодоления некоторого противодействия. Поэтому дипольно-релаксационная поляризация связана с потерями энергии и нагревом диэлектрика, это отражено на рисунке 2.1, а в виде последовательно включенного с конденсатором $C_{др}$ активного сопротивления $r_{др}$. После снятия электрического поля ориентация частиц постепенно ослабевает вследствие теплового движения. Время релаксации — это промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных диполей уменьшается в e ($\approx 2,7$) раза. При нагреве молекулярные силы ослабляются, что должно облегчить дипольно-релаксационную поляризацию. Однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от температуры характеризуется наличием максимума [3].

В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что при быстропеременных полях диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и способность к поляризации уменьшается с увеличением частоты приложенного напряжения [1].

Дипольно-релаксационная поляризация свойственна полярным жидкостям; однако этот вид поляризации может наблюдаться также и в твёрдых полярных органических веществах. Но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже поворотом не самой молекулы, а имеющихся в ней полярных радикалов по отношению к молекуле. Такую поляризацию называют также **дипольно-радикальной**. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп — ОН и кислорода [2].

Целлюлоза — органическое соединение, клетчатка, углевод и полисахарид. Является основным строительным материалом флоры — образует клеточные стенки деревьев и растений. Внешне выглядит, как белое твёрдое вещество, в воде и слабых кислотах не растворяется. Выдерживает нагрев до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, а воспламеняется при 275 градусах. В 2016 году опытным путём установили, что целлюлоза при нагреве до 467 градусов начинает плавиться, при этом температура самовозгорания — $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19].

Ионно-релаксационная поляризация ($C_{ир}, r_{ир}$) наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов, например в неорганических стёклах, и связана с необратимой потерей энергии. В этом случае на фоне хаотических тепловых движений слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля получают избыточные перебро-сы в направлении поля и смещаются на расстояния, превышающие постоянную решётки. После снятия поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия.

Электронно-релаксационная поляризация ($C_{эр}, r_{эр}$) возникает за счёт возбуждения тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок. Она характерна для диэлектриков, приближающихся по свойствам к полупроводникам. Для этого механизма следует отметить относительно высокую способность к поляризации, а также наличие максимума при определённой температуре [1].

Резонансная поляризация ($C_{рез}, r_{рез}$) наблюдается в диэлектриках при световых частотах. Она зависит от физико-химических особенностей вещества, может относиться к собственной частоте электронов или ионов (при очень высоких частотах) или к характеристической частоте дефектных электронов (при более низких частотах). Резонансные потери наблюдаются в газах и твёрдых телах, если частота электрического поля совпадает с частотой собственных колебаний частиц. Они выражаются в интенсивном поглощении энергии электромагнитного поля и используются для накачки лазеров.

Миграционная поляризация (C_m, r_m) является дополнительным механизмом поляризации, проявляющимся в твёрдых телах неоднородной структуры при наличии в них проводящих и полупроводящих вкраплений. Эта поляризация проявляется при наиболее низких частотах и связана со значительными потерями электрической энергии. Причинами возникновения такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоёв с различной проводимостью и т. д. При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, которое становится подобным огромной поляризованной молекуле. В граничных слоях слоистых материалов и в приэлектродных слоях может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов, что создает эффект миграционной поляризации [1].

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация ($C_{сп}, r_{сп}$) существует у группы твёрдых диэлектриков, обладающих такими же особенностями поляризации, как и сегнетова соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), а потому получивших название **сегнетоэлектриков**.

Сегнетоэлектрики — кристаллические диэлектрики, обладающие в определённом интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, которая существенно изменяется под влиянием внешних воздействий. Электрические свойства сегнетоэлектриков во многом подобны магнитным свойствам ферромагнетиков (отсюда название ферроэлектрики, принятое в зарубежной литературе). К числу наиболее исследованных и используемых на практике сегнетоэлектриков относятся титанат бария, сегнетова соль (давшая название всей группе кристаллов), триглицинсульфат, дигидрофосфат калия и др. [20]

У сегнетоэлектриков наблюдается доменная структура, а зависимость заряда от напряжения (кулон-вольтная характеристика) имеет форму петли гистерезиса.

Сегнетоэлектрики находят применение:

- для изготовления малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью;

- для изготовления материалов с большой нелинейностью поляризации;
- для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств;
- в вычислительной технике для ячеек памяти;
- для модуляции и преобразования лазерного излучения;
- в пьезо- и пирозлектрических преобразователях.

Резистор $R_{\text{и}}$ соответствует потерям на ионизацию, происходящую при коронных разрядах и также в газовых включениях внутри жидких и твёрдых диэлектриков.

2.3 Диэлектрическая проницаемость материала и угол потерь

Эквивалентная схема замещения диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, представлена на рисунке 2.1, б в виде соединённых параллельно конденсатора C и резистора R .

Способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле складывается из различных механизмов и характеризуется значением относительной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (2.1)$$

где C – ёмкость конденсатора, заполненного диэлектриком;

C_0 – ёмкость конденсатора того же размера в вакууме.

Диэлектрическая проницаемость материала ε формируется за счёт различных механизмов поляризации и зависит от температуры и частоты, её изменение при нагреве характеризуется **температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости** $\text{ТК}\varepsilon$, измеряемым в K^{-1} (в долях на градус Кельвина). Для газов, неполярных жидкостей и твёрдых диэлектриков характерен отрицательный $\text{ТК}\varepsilon$, что объясняется их расширением при нагреве. Для полярных жидких и твёрдых изоляционных материалов характерен положительный $\text{ТК}\varepsilon$, т. к. подвижность диполей при нагреве увеличивается, однако возможны и участки с отрицательным $\text{ТК}\varepsilon$. Численные значения $\text{ТК}\varepsilon$ для большинства изоляционных материалов находятся в пределах от миллионных до тысячных долей на кельвин [1].

Диэлектрическими потерями называют энергию электрического поля, затрачиваемую на нагрев диэлектрика. При переменном напряжении потери энергии в диэлектрике намного больше, чем при постоянном, здесь основной причиной нагрева является периодическое изменение поляризации диэлектрика.

Если напряжения и токи синусоидальны, то их можно представить в виде проекций на вертикальную ось векторов, вращающихся против часовой стрелки с угловой частотой ω (радиан в секунду, с^{-1})

$$\omega = 2 \pi f, \quad (2.2)$$

где f – частота колебания, Гц.

Рисунок 2.1, в является векторной диаграммой, а точки проекции концов векторов на вертикальную ось координат описывают осциллограммы на ленте, протягиваемой в горизонтальном направлении.

Протекание синусоидального тока через конденсатор сопровождается его периодической перезарядкой. В идеальном конденсаторе C напряжение отстаёт от тока на четверть периода, т. е. на 90° (электрических).

Идеальный конденсатор характеризуется только ёмкостью. Индуктивность, утечка, тангенс угла потерь, диэлектрическое поглощение а также сопротивление выводов равны нулю. Идеальные конденсаторы представляют собой конденсаторы, сопротивление между обкладками которых в установившемся режиме на постоянном токе равно бесконечности.

Реальные конденсаторы, помимо ёмкости, обладают также собственными сопротивлением и индуктивностью [6].

На векторной диаграмме рисунка вектор ёмкостного тока, равного $U\omega C$, повёрнут относительно напряжения U на 90° против часовой стрелки, т. е. в сторону опережения. В реальной диэлектрике угол φ сдвига фаз между током и напряжением немного меньше, т. к. присутствует ток утечки через сопротивление R изоляции, равный U/R и совпадающий по фазе с напряжением U .

Углом потерь энергии в материале диэлектрика называют угол δ , дополняющий угол сдвига фаз φ между напряжением и током до 90° . Для оценки качества изоляционного материала используют тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. Значение **тангенса угла диэлектрических потерь** $\operatorname{tg}\delta$ показывает, какая часть от энергии, запасаемой в изоляционном материале в процессе поляризации, теряется, т. е. расходуется на его нагрев. Чем меньше угол δ и его тангенс, тем меньше энергии теряется за 1 цикл переполаризации, следовательно, такой материал можно применять при более высокой частоте.

Потери энергии конденсатора вызывают его нагрев и могут привести к тепловому разрушению. Если конденсатор используется в колебательном контуре, то потери препятствуют острой настройке на резонанс. Они проявляются через снижение добротности контура и ускоренное затухание колебаний. Потери в изоляции проводов линий связи уменьшают дальность передачи сигналов. Оценка диэлектрических потерь имеет важное значение не только для высокочастотных устройств, но и для материалов, используемых в установках высокого напряжения. Особенно она важна в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку мощность диэлектрических потерь пропорциональна квадрату действующего значения приложенного к диэлектрику напряжения [1]. Мощность потерь в изоляции P , Вт,

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg}\delta, \quad (2.3),$$

где ω — угловая частота, с^{-1} ;

C — эквивалентная ёмкость изоляции, Ф;

U — действующее значение напряжения, В;

δ — угол диэлектрических потерь, $\operatorname{tg}\delta = 1/(R\omega C)$;

R — эквивалентное сопротивление изоляции, Ом.

Следует помнить, что параметры C и R схемы замещения определяются при определённых значениях частоты тока и температуры изоляции, и при других режимах будут иными.

Мощность потерь, отнесенную к единице объёма диэлектрика, называют **удельными потерями** и измеряют в ваттах на кубометр.

Характер проявления диэлектрических потерь различен в зависимости от агрегатного состояния электроизоляционных материалов:

- газообразного,
- жидкого,
- твёрдого.

В *газах* наблюдаются ионизационные потери при высоких напряжениях и, чаще всего, в неоднородном поле, когда напряжённость в отдельных местах превосходит некоторое критическое значение в газе. Ионизация воздуха в порах твёрдой органической изоляции сопровождается образованием озона и окислов азота, что вызывает её химическое разрушение.

В чистых *неполярных жидкостях* диэлектрические потери обусловлены только электропроводностью и пренебрежимо малы. У хорошо очищенного нефтяного трансформаторного масла $tg\delta = 0,001$ при $\varepsilon = 2,3$.

В *полярных жидкостях* потери в основном поляризационные. Удельная электропроводность полярных жидкостей при комнатной температуре составляет 10^{-10} – 10^{-11} См/м, а дипольно-релаксационные потери, наблюдаемые при переменном напряжении, значительно превосходят потери от электропроводности, ввиду чего полярные жидкости используют только на промышленной частоте.

В *твёрдых веществах*, в зависимости от их состава и строения, возможны все виды диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери в особо чистых неполярных веществах с молекулярной структурой ничтожно малы. Полиэтилен, фторопласт, полистирол и другие полимеры широко применяют в качестве высокочастотной изоляции, в том числе и высоковольтной.

Полярные полимеры — поливинилхлорид, эпоксидные компаунды, кремнийорганические и фенолформальдегидные смолы, целлюлоза и другие из-за дипольно-релаксационной поляризации отличаются повышенными потерями и применяются в основном на промышленной частоте 50 Гц.

Диэлектрические потери в веществах с ионной структурой зависят от особенностей упаковки ионов в кристаллической решётке. В веществах с плотной упаковкой ионов в отсутствие примесей, искажающих решётку, диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в этих веществах обнаруживаются потери на электропроводность. К веществам данного типа относятся слюда и другие кристаллические неорганические соединения, имеющие большое значение в производстве электротехнической керамики, например, корунд, входящий в состав ультрафарфора.

Слюда — самый распространенный минерал, активно используемый в промышленности. Наибольшее распространение получили мусковит, флогопит, поскольку их относительно легко добывать они отличаются инертностью к химическим веществам. Слюда различается по цветовой гамме — мусковит серебристый, темный флогопит — от зеленых и янтарных до черных оттенков.

В промышленной сфере использование слюды несколько ограничено, поскольку в результате нагрева более +500 градусов образуется кристаллизационная вода, увеличивающая электропроводность минерала [21].

К диэлектрикам, имеющим кристаллическую структуру с неплотной упаковкой ионов, относится ряд кристаллических веществ, характеризующихся релаксационной поляризацией, вызывающей повышенные диэлектрические потери. Многие из них входят в состав изоляторного фарфора и огнеупорной керамики.

Диэлектрические потери в квазиаморфных веществах с ионной структурой (неорганических стёклах) в большой степени зависят от их состава ($\operatorname{tg} \delta$ от 0,0002 до 0,01). При совпадении частоты напряжения с частотой колебаний ионов происходят *резонансные потери*.

Сегнетоэлектрики переполяризуются по петле гистерезиса, поэтому для них характерны весьма большие значения тангенса угла диэлектрических потерь, достигающие 0,1.

2.4 Пробой изоляции и электрическая прочность диэлектрика

Находясь в электрическом поле, диэлектрик может потерять свойства изоляционного материала, если напряжённость поля превысит некоторое критическое значение. Явление образования проводящего канала под действием электрического поля называют **пробоем**. Если произошел пробой газовой изоляции, то благодаря высокой подвижности молекул пробитый участок после снятия напряжения восстанавливается. Жидкий диэлектрик также может восстановить свои изоляционные свойства, но частично, так как загрязняется из-за распада части молекул. Пробой твёрдых диэлектриков приводит к необратимому разрушению изоляции.

Значение напряжения, приводящего к пробое изоляции, называют **пробивным напряжением** $U_{\text{пр}}$. Значение пробивного напряжения зависит от толщины диэлектрика h и формы изоляционной детали, а также конфигурации электродов и параметров приложенного напряжения — полярности, частоты, амплитуды. Поэтому оно характеризует не столько свойства материала, сколько способность конкретного изоляционного изделия противостоять воздействию конкретного электрического поля. Характеристикой самих материалов, удобной для их сравнения, является электрическая прочность. **Электрической прочностью** называют напряжённость $E_{\text{пр}}$, соответствующую пробивному напряжению $U_{\text{пр}}$ в однородном электрическом поле [1].

Однородным называют поле, в каждой точке которого напряжённость имеет одно и то же значение и направление.

Однородное поле может быть получено между плоскими электродами с закруглёнными краями, а также между сферами, если расстояние между ними не превышает их диаметра. Электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ измеряется в вольтах, делённых на метр,

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/h, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{пр}}$ — пробивное напряжение;

h — расстояние между электродами.

На практике используют единицу измерения $\text{kV}/\text{мм} = \text{MB}/\text{м}$.

По механизму нарушения изоляции различают:

- электрический,
- электротепловой
- электрохимический пробой.

Электрический пробой происходит в результате развития процессов ударной и фотонной ионизации материала диэлектрика. Этот процесс характерен для газов, однако его можно наблюдать в особо чистых неполярных жидкостях и твёрдых веществах.

Причиной теплового пробоя является разогрев материала из-за диэлектрических потерь. Он характерен для полярных жидкостей и твёрдых материалов с неплотной упаковкой атомов, содержащих подвижные ионы или группы ионов.

Однако, чаще всего, причиной выхода изоляции из строя является электрохимический пробой, происходящий в результате её старения — постепенного необратимого ухудшения свойств из-за различных химических реакций, особенно вызванных воздействием высокого напряжения [1].

2.5 Электрический пробой газа в однородном поле

Пробой газа в однородном поле происходит в результате развития стримера путём ударной и фотонной ионизации (рисунок 2.2.)

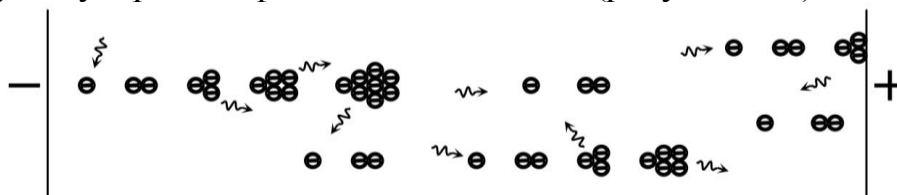


Рисунок 2.2 – Фотонно-ударный механизм развития стримера при лавинном пробое газа в однородном электрическом поле

Небольшое количество свободных электронов образуется в газе под действием солнечных и космических излучений либо радиоактивного излучения Земли. Содержащиеся в газе электроны находятся в беспорядочном тепловом движении. При воздействии напряжённости электрического поля электрон начинает двигаться с ускорением, приобретая дополнительную энергию. Дополнительная энергия электрона сообщается атомам или молекулам газа, с которыми он сталкивается. Если энергия достаточно велика, при столкновении электрона с атомом происходит его **ионизация**, т. е. расщепление на электрон и положительный ион. Значения энергии ионизации различных газов лежат в пределах от 4 до 25 эВ. В результате ударной ионизации число свободных электронов и ионов лавинообразно нарастает [2].

Если в процессе ускорения электрон не смог набрать энергию, достаточную для ионизации атома, он переводит атом в возбужденное состояние, изменяя структуру его электронной оболочки. В следующий момент этот «возбужденный» атом возвращается в спокойное состояние, отдавая свою избыточную энергию в форме излучения — **испускает фотон** [3].

Направление движения испускаемых фотонов не зависит от электрического поля, а скорость близка к скорости света. При поглощении

фотона другим атомом возможна его ионизация. Внутренняя фотонная ионизация газа, благодаря большой скорости распространения излучения, приводит к особо быстрому развитию стримеров — **каналов с повышенной проводимостью газа**. Схема, представленная на рисунке 2.2, поясняет, почему рост электропроводящего канала (стримера) происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. Волнистыми линиями изображены пути фотонов. Фотоны обгоняют лавину и ионизируют частицы газа. Зарождается новая лавина. Нагоняя друг друга, отдельные лавины сливаются в сплошной канал ионизированного газа [2].

Экспериментально установлен **закон Пашена** — зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ от $p \cdot h$ (произведения давления p на расстояние между электродами h). График этой зависимости изображён на рисунке 2.3, а.

На графике виден явно выраженный минимум и две восходящие ветви. Анализируя закон Пашена, следует отметить, что минимальное напряжение, при котором может произойти пробой воздуха, составляет около 300 В.

Разделим обе координаты на h и получим зависимость электрической прочности $E_{пр}$ от давления p при неизменном расстоянии между электродами, изображённую на рисунке 2.3, б. При увеличении давления электрическая прочность газа возрастает в результате уменьшения расстояния между молекулами и, соответственно, длины свободного пробега электронов. При малых давлениях увеличение электрической прочности объясняется уменьшением вероятности столкновения электронов с молекулами газа на их пути к положительному электроду [1].

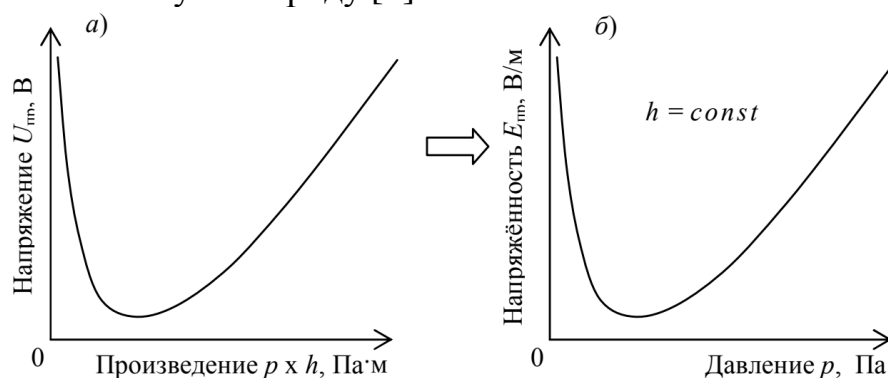


Рисунок 2.3 – Закон Пашена (а) и зависимость электрической прочности от давления (б)

Из графиков следует два вывода.

1. При проектировании высоковольтного оборудования следует учитывать толщину возможных разрядных промежутков.
2. Для увеличения электрической прочности газовой изоляции следует либо откачивать газы до вакуума, либо сжимать их повышенным давлением.

При нормальном давлении 1 см воздуха пробивается при напряжении около 30 кВ.

Электрическая прочность газа зависит от его химического состава. Особо высокая электрическая прочность у тяжелых газов, содержащих фтор и хлор. Во внешней электронной оболочке **галогенов** (химические элементы 17-й

группы периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева (по устаревшей классификации — элементы главной подгруппы VII группы), сильнейшие окислители) не хватает всего одного электрона, и они легко захватывают свободный электрон, выключая его из процесса ионизации. Инертные газы (относятся к 18-й группе химических элементов периодической таблицы Менделеева, одноатомные газы, с большим трудом взаимодействующие с другими веществами) обладают пониженной электрической прочностью, что используется при образовании плазмы в газоразрядных приборах.

Газоразрядные приборы (ионные приборы), электровакуумные приборы, — действие которых основано на использовании явления газового разряда — совокупности электрических, оптических и тепловых явлений, сопровождающих прохождение электрического тока через инертные газы, водород или пары металла (ртути). Возникающие при этом электрические разряды сопровождаются излучением света (свечением), характерного для данного газа или пара спектрального состава [22].

Ещё меньше электрическая прочность паров металлов, из которых наибольшее техническое применение нашли пары ртути и натрия.

2.6 Особенности пробоя газа в неоднородном поле

Пробой газа в неоднородном поле происходит при меньшем напряжении, чем в однородном. Для исследования этого процесса используют поле между остриём и плоскостью. Зависимость пробивного напряжения от расстояния при различной полярности электродов показана на рисунке 2.4 [1].

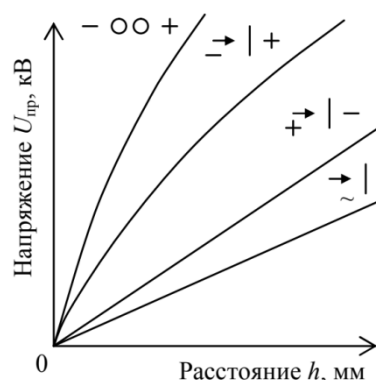


Рисунок 2.4 – Пробой газа в неоднородном поле

Вблизи острия напряжённость поля выше, чем на удалении, и если она достигает критических значений, на острие возникает частичный разряд (ЧР), сопровождаемый свечением и негромким звуком. Свечение на концах мачт в грозу называли «огнями святого Эльма», это же явление можно наблюдать на острых шпилях зданий и громоотводах.

Частичным разряд называют потому, что вдали от острия условия ударной ионизации не соблюдаются, и пробой не происходит. Однако фотонная ионизация происходит во всём объеме разрядного промежутка, что приводит к значительному уменьшению пробивного напряжения, особенно при положительной полярности острия.

В результате ионизации вблизи острия образуются электроны и ионы. При положительной полярности острия электроны быстро нейтрализуются на

нём, а малоподвижные положительно заряженные ионы создают объёмный заряд, который фактически является продолжением острия и сокращает эффективную длину разрядного промежутка. При отрицательной полярности острия объёмный положительный заряд играет роль экрана, сглаживающего неоднородности поля в разрядном промежутке.

При возрастании напряжения в неоднородном поле вначале возникает частичный разряд вблизи острия. По мере увеличения напряжения корона переходит в искровой разряд.

О вреде частичных разрядов [3].

1. Уменьшают напряжение пробоя изоляционного промежутка.
2. При частичном разряде образуются активные газы, разрушающие изоляцию. Под действием этих газов, особенно озона, в присутствии воды в твёрдой изоляции развиваются водяные дендриты (водные триинги), прорастающие вглубь материала подобно корням деревьев, что со временем приводит к пробоя изоляции.
3. Электрическая энергия частичного разряда переходит в тепловую и световую.
4. Частичные разряды являются источником радиопомех. Искусство проектировщика высоковольтного оборудования — сгладить неоднородности поля, чтобы не было частичных разрядов.

Поверхностный пробой (перекрытие изоляции) можно наблюдать при испытании и эксплуатации твёрдых диэлектриков с высокой электрической прочностью. В случае поверхностного пробоя структура твёрдого диэлектрика не нарушается, однако пробивное напряжение вдоль поверхности твёрдого диэлектрика значительно меньше, чем в воздухе при той же длине разрядного промежутка, особенно при повышенной влажности и загрязнении этой поверхности.

Для предотвращения поверхностного пробоя необходимо по возможности увеличивать длину разрядного пути вдоль поверхности твёрдого диэлектрика. Этому способствует создание ребристой поверхности изоляторов, проточка разного рода канавок, изготовление конструкций с «утопленными» электродами. Повышение рабочих напряжений достигается также сглаживанием неоднородностей электрического поля за счёт изменения формы электродов или оптимизации конструкции изолятора, а также за счёт нанесения на поверхность изолятора полупроводящих покрытий или диэлектрических плёнок с повышенной диэлектрической проницаемостью [2].

2.7 Изоляционные газы и жидкости

Для высоковольтной изоляции наиболее широкое применение находит **элегаз** (электрический газ, гексафторид серы SF_6). Он инертен по отношению к меди и алюминию, химически стоек до 800 °С.

Инертный газ — группа химических элементов со схожими свойствами: при нормальных условиях они представляют собой одноатомные газы без цвета, запаха и вкуса, с очень низкой химической реактивностью. К таким газам относятся гелий (He), неон (Ne), аргон (Ar), криптон (Kr), ксенон (Xe) и радиоактивный радон (Rn) [23].

Электрическая прочность элегаза в 2,5 раза больше, чем у воздуха, что позволяет значительно уменьшить объём и массу газонаполненного электрооборудования, по сравнению с воздушным.

Элегаз применяется в герметизированных распределительных устройствах, конденсаторах, трансформаторах, выключателях и высоковольтных кабелях. Газонаполненные (элегазовые) кабели просты по своей конструкции, имеют малые емкостные (зарядные) токи. Трансформаторы с элегазовым заполнением взрывобезопасны. В высоковольтных выключателях элегаз применяется благодаря его высоким дугогасящим свойствам.

Основные недостатки: опасны разряды в элегазе в присутствии органической изоляции, так как образуются химически очень активные и ядовитые вещества; сравнительно высокая стоимость. В целях удешевления газовой изоляции часто применяют элегаз в смеси с более дешёвым азотом.

Перспективны перфторированные углеводороды, в молекулах которых все атомы водорода заменены фтором. От CF_4 до C_4F_{10} в нормальных условиях являются газами с электрической прочностью большей, чем у воздуха в 6–10 раз, а также фреон CCl_2F_2 — в 2,5 раза.

Жидкие диэлектрики, благодаря большей плотности, отличаются более высокими значениями электрической прочности, чем газы.

Пробой технически чистых жидкостей объясняют частичным перегревом жидкости и вскипанием её в местах наибольшего количества примесей, что приводит к образованию газового мостика, по которому и происходит пробой.

Наибольшее распространение получило **трансформаторное масло** — жидкость от почти бесцветного до тёмно-жёлтого цвета, представляющая собой смесь различных углеводородов. Получается из нефти посредством её ступенчатой перегонки с последующей тщательной очисткой от химических примесей. Основные области применения трансформаторного масла — силовые маслonaполненные трансформаторы и высоковольтные масляные выключатели.

Заполняя поры волокнистой изоляции, масло существенно повышает её электрическую прочность, улучшает отвод тепла от обмоток и сердечников, а в масляных выключателях способствует гашению электрической дуги, возникающей между расходящимися контактами [6].

При работе в электрических устройствах масло постепенно ухудшает свои характеристики (стареет), становится более тёмным. В нём образуются загрязняющие продукты — кислоты, смолы как растворимые в масле, так и не растворимые — “ил”, который осаждается на дно бака и на погруженные в масло детали, значительно ухудшая отвод тепла. Кроме того, образующиеся кислоты разрушают изоляцию обмоток и вызывают коррозию металлов.

Скорость старения масла возрастает при доступе воздуха (окисление кислородом, озоном), повышении температуры, соприкосновении масла с некоторыми металлами (медь, железо, свинец и т. д.), воздействии света и электрического поля высокой напряжённости, а особенно под воздействием дуги.

Регенерация масла, т. е. удаление из масла продуктов старения, осуществляется обработкой его адсорбентами (особые типы глин или искусственные материалы), поглощающими влагу и примеси полярного

характера. Для замедления старения масла применяются воздухоочистительные фильтры, ингибиторы (антиокислительные присадки), используется азотная защита и т.д. Для удаления влаги производят термическую сушку трансформаторного масла [2].

По своим электрическим характеристикам хорошо очищенное от примесей и влаги трансформаторное масло имеет свойства неполярного диэлектрика:

- $\varepsilon=2,2 \dots 2,3$ (относительной диэлектрической проницаемости);
- $\operatorname{tg}\delta \leq 0,003$ (тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$);
- $\rho=10^{12} \dots 10^{13}$ Ом·м (удельное сопротивление).

Характеристики приведены для $t = 20^\circ\text{C}$ и $f = 50$ Гц.

Практически важные свойства трансформаторного масла нормируются стандартом ГОСТ 982 – 80. К ним относятся:

- кинематическая вязкость,
- температура вспышки паров,
- температура застывания,
- кислотное число.

Электрическая прочность трансформаторного масла стандартом не нормируется, но предусматривается правилами технической эксплуатации электростанций (ПТЭ) [24].

Недостатком трансформаторного масла является его горючесть.

Конденсаторное масло служит для пропитки бумажных конденсаторов и отличается особо тщательной очисткой адсорбентами.

Кабельные масла используются для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей. Для увеличения вязкости в них добавляют канифоль или синтетический загуститель.

Полиизобутилен низкой степени полимеризации отличается от нефтяных масел лучшими диэлектрическими свойствами, используется в бумажных конденсаторах и для пропитки бумажной изоляции кабелей (нестекающая изоляция).

Совол ($\text{C}_{12}\text{H}_5\text{Cl}_{15}$) представитель хлорированных углеводородов. Полярный диэлектрик с $\varepsilon=4,5-5$, применяется для пропитки изоляции бумажных конденсаторов. Совол не горюч, химически нейтрален ко всем видам изоляции и не окисляется на воздухе даже при небольшом нагреве. Однако из-за возможности образования токсичных соединений при высокой температуре хлорированные углеводороды в технически передовых странах выводят из употребления.

Кремнийорганические жидкости нетоксичны, не гигроскопичны, нагревостойки. Применяются для пропитки конденсаторов, заливки маломощных трансформаторов и других устройств. По своим электрическим характеристикам приближаются к неполярным диэлектрикам:

- $\varepsilon=1,4...2,5$;
- $\operatorname{tg}\delta=(2 \dots 3)10^{-4}$;
- $\rho=10^{11} \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- $U_{\text{пр}} \geq 45 \text{ кВ}$ (в стандартном разряднике при расстоянии между электродами 2,5 мм).

Температура вспышки паров кремнийорганических жидкостей нормируется не ниже 300 °С, при более высоких температурах эти жидкости самовоспламеняются. Как и другие кремнийорганические диэлектрики, эти жидкости весьма дорогие [1].

Фторорганические жидкости имеют высокие электрические характеристики, ничтожно малую гигроскопичность и высокую нагревостойкость (200 °С и выше), очень высокую химическую стойкость, негорючи, дугостойки, взрывобезопасны. Обеспечивают интенсивный отвод тепла от обмоток и магнитопроводов, особенно в режиме «кипящей изоляции». Очень дорогие.

2.8 Особенности пробоя твёрдой изоляции

У твёрдых диэлектриков могут наблюдаться три основных механизма пробоя [25]:

- электрический,
- тепловой,
- электрохимический.

Каждый из указанных механизмов пробоя может иметь место в одном и том же материале в зависимости от характера электрического поля, в котором он находится, — постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; времени воздействия напряжения; наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор; толщины материала; условий охлаждения и т. д.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твёрдом теле создается электронная лавина. Развитие лавин сопровождается **фотоионизацией** (как в газах), которая ускоряет образование проводящего канала. Ускоренные полем электроны при столкновениях передают свою энергию узлам решётки и разогревают её вплоть до плавления. В разрядном канале создается значительное давление, которое может привести к появлению трещин или полному разрушению изолятора [1].

Электрический пробой имеет место там, где исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, нагревающих материал, а также отсутствует ионизация газовых включений. При этом электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ может превышать 1000 МВ/м. Электрический пробой наблюдается у большинства диэлектриков при кратком (импульсном) воздействии напряжения.

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепловой энергии, выделяющейся в диэлектрике за счёт диэлектрических потерь, превышает то количество энергии, которое может рассеиваться в данных условиях; при этом нарушается тепловое равновесие и процесс приобретает необратимый характер. Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих расплавлению, обугливанию и пр. Электрическая прочность при тепловом пробое является характеристикой не только материала, но и изделия из него.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и др. Кроме того, «электротепловое» пробивное напряжение зависит от нагревостойкости материала; органические диэлектрики (например, полистирол) имеют более низкие значения электротепловых пробивных напряжений, чем неорганические (кварц, керамика) при прочих равных условиях вследствие их малой нагревостойкости. Типичными признаками теплового пробоя является уменьшение пробивного напряжения по экспоненте с ростом температуры, а также временная задержка пробоя [1].

Разновидностью теплового пробоя можно считать **ионизационный пробой**. Он характерен для твёрдых пористых диэлектриков, обусловлен ионизацией газа в порах и особенно опасен в хрупких материалах, поскольку термомеханические напряжения могут превзойти предел прочности материала и вызвать его растрескивание.

Тонкие плёнки обладают существенно более высокой электрической прочностью, чем массивные образцы благодаря упорядоченной структуре и лучшему охлаждению.

Электрохимический пробой электротехнических материалов наблюдается при повышенных температурах и высокой влажности.

При постоянном и переменном напряжении низкой частоты в материале развиваются процессы, приводящие к необратимому уменьшению сопротивления изоляции (электрохимическое старение). Кроме того, электрохимический пробой можно наблюдать при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся нагревом и восстановлением. Например, в керамике, окислов металлов переменной валентности. Электрохимический пробой развивается во многих органических диэлектриках, особенно под действием частичных разрядов.

Частичные разряды происходят в местах наибольшей напряжённости электрического поля, там, где наблюдается его неоднородность. Разрушение изоляции происходит в виде специфических дефектов, которые раньше называли водяными дендритами (гр. *dendron* – дерево), а теперь используют термин **водные триинги** (англ. *tree* – дерево). Дендрит прорастает в изоляционный слой подобно корням дерева, при этом постепенно увеличивается мощность разряда, а эффективная толщина изоляции уменьшается, что, в конце концов, приводит к пробое. Процессы прорастания дендритов длятся годами и десятилетиями, современный уровень развития техники позволяет их контролировать, прогнозируя момент выхода электрооборудования из строя и оценивая остаточный ресурс службы [1].

2.9 Получение и применение полимеров

Полимерами называют высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа структурно повторяющихся звеньев — **мономеров**. Молекулярная масса полимеров достигает 10^6 . Полимеризацией называют образование полимера из мономеров путём последовательного соединения мономеров в присутствии инициаторов.

Рассмотрим в качестве примера процесс полимеризации этилена $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ с молекулярной массой 28, который в нормальных условиях находится в газообразном состоянии. Структурную формулу полиэтилена можно записать в виде $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$, где n — степень полимеризации, т. е. число молекул мономера, объединяющихся в молекулу полимера. По мере увеличения n полиэтилен становится все более вязкой жидкостью, а при $n=1250$ и молекулярной массе 35000 представляет собой твёрдый диэлектрик.

В реальных условиях **полимерные материалы** — это смеси веществ с различной степенью полимеризации, так что практически можно говорить лишь о средней степени полимеризации. К числу веществ, получаемых путём полимеризации, относятся полистирол, поливинилхлорид, полиизобутилен и полиметилметакрилат и др.

Высокомолекулярные соединения могут быть получены также путём реакции поликонденсации, связанной с взаимодействием функциональных групп мономеров с одновременным выделением воды или других низкомолекулярных веществ.

Полимерные материалы, полученные путём поликонденсации, как правило, обладают пониженными электрическими свойствами по сравнению с материалами, полученными по реакции полимеризации. Основной причиной этого является наличие в поликонденсационных диэлектриках остатков побочных низкомолекулярных веществ (воды, кислот, спирта), которые, распадаясь на ионы, увеличивают проводимость материала. Кроме того, молекулы конденсационных полимеров содержат полярные группы, что повышает их угол диэлектрических потерь и гигроскопичность [1].

Линейные и пространственные полимеры. В зависимости от пространственной структуры макромолекул полимеры делят на три основных типа:

- линейные,
- разветвлённые,
- пространственные.

В **линейных полимерах** макромолекулы представляют собой цепочечные последовательности повторяющихся звеньев. При этом отношение длины молекулы к её поперечным размерам может достигать 1000.

В **пространственных полимерах** макромолекулы связаны в общую сетку. Типичными пространственными полимерами являются фенолоформальдегидные и эпоксидные смолы, а также сильно вулканизированный каучук (эбонит, эскапон).

Между свойствами линейных и пространственных полимеров имеются существенные различия. Как правило, линейные полимеры сравнительно гибки и эластичны, большинство из них при умеренном повышении температуры

легко размягчается и расплавляется. Пространственные полимеры обладают большой жесткостью, их расплавление происходит при высоких температурах, а многие из них до достижения температуры плавления разрушаются химически (сгорают, обугливаются и т. п.). В связи с этими свойствами линейные полимеры в практике называют **термопластичными** материалами, а пространственные — **термореактивными**.

Благодаря слабому межмолекулярному взаимодействию линейные полимеры в большинстве случаев обладают способностью набухать и растворяться в подходящих по составу растворителях с образованием вязких растворов, из которых затем получают прочные плёнки и волокна. Пространственные полимеры с трудом поддаются растворению, а значительная часть из них нерастворима.

Полимеры с гибкими макромолекулами регулярного строения обладают способностью образовывать кристаллическую фазу, которая характеризуется упорядоченным расположением молекул. В кристалле полимера макромолекулы плотно упакованы и им трудно проявлять свою гибкость. Такие полимеры обычно являются жесткими материалами с высокой прочностью.

Аморфные полимеры характеризуются отсутствием дальнего порядка в расположении макромолекул, хотя и в этом случае полимеры не являются полностью неупорядоченными.

Состав полимерных цепей. По химическому составу полимеры можно разделить на **органические** и **элементоорганические**. К **органическим** полимерам относят такие высокомолекулярные соединения, у которых главная цепь состоит из углерода или комбинации углерода с кислородом, азотом, серой и фосфором.

Элементоорганическими называют такие полимеры, главная цепь которых не содержит атомов углерода, но обрамляется органическими группами. Наиболее распространёнными представителями этих материалов являются кремнийорганические соединения (силиконы).

Электрические свойства. Строение макромолекул во многом определяет электрические свойства полимеров. Все химические связи углерода с другими элементами в той или иной степени полярны. Если молекула имеет симметричное строение, то дипольные моменты отдельных связей уравниваются друг друга, благодаря чему в целом вещество практически неполярно, гигроскопичность его ничтожно мала и поэтому оно имеет малое значение тангенса угла диэлектрических потерь и низкую удельную проводимость.

Гигроскопичность — способность некоторых веществ поглощать водяные пары из воздуха. Примерами гигроскопичных веществ являются: мёд, этанол, метанол, глицерин.

Вещества с несимметрично построенными звеньями полимерных молекул полярны и обладают невысокими электрическими характеристиками.

Нагревостойкость. Большинство органических полимеров может длительно работать лишь при температурах ниже 100 °С. Выше этой температуры, как правило, происходит быстрое тепловое старение материала. Поэтому основной проблемой химии высокомолекулярных соединений всегда было создание более нагревостойких материалов при сохранении у них

гибкости, эластичности и других свойств, характерных для органических веществ. В настоящее время промышленностью производятся и весьма нагревостойкие высокомолекулярные материалы, например, фторсодержащие полимеры, кремнийорганические соединения, полиимиды [1].

2.10 Неполярные полимеры

Из неполярных полимеров наиболее важное техническое значение имеют полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен (фторопласт-4) [2,3].

Полиэтилен — основной полимерный материал для высокочастотной и высоковольтной изоляции. Применяя различные катализаторы, получают полиэтилены высокого, среднего и низкого давления, отличающиеся друг от друга степенью кристалличности и механической прочностью. В последнее время всё шире применяется изоляция из сшитого полиэтилена. Сшивание линейных молекул полиэтилена в пространственную структуру происходит при радиоактивном облучении и повышает механическую прочность и нагревостойкость.

Полипропилен обладает большей механической и электрической прочностью, а также нагревостойкостью.

Полистирол получают из мономера стирола $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$, который представляет собой легкую бесцветную синтетическую жидкость с характерным запахом.

Стирол легко полимеризуется даже при хранении на холоде. В темноте и при отсутствии катализаторов он постепенно превращается в твёрдую, прозрачную и бесцветную, как стекло, массу. В ряде случаев у изделий из полистирола намечается тенденция к постепенному образованию тончайших трещин. Чтобы предотвратить это явление и уменьшить хрупкость полистирола, к нему иногда добавляют некоторые виды синтетических каучуков.

Основные свойства неполярных диэлектриков приведены в таблице 2.1.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4, тефлон) получают путём полимеризации тетрафторэтилена $\text{F}_2\text{C} = \text{CF}_2$ (этилен, в молекуле которого все четыре атома водорода замещены атомами фтора).

Таблица 2.1 — Основные свойства неполярных полимеров

Свойства полимеров	Полиэтилен	Полистирол	Фторопласт-4
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	$10^{14} - 10^{16}$	$10^{14} - 10^{16}$	$10^{14} - 10^{16}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	2,3 – 2,4	2,5 – 2,6	1,9 – 2,2
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 Гц	$2 - 5 \cdot 10^{-4}$	$2 - 4 \cdot 10^{-4}$	$2 - 3 \cdot 10^{-4}$
Электрическая прочность, МВ/м	40 – 150*	20 – 110*	40 – 250*
Нагревостойкость, °С	105 – 130	75 – 80	~300
*Верхние пределы для материалов в виде пленки			

Среди всех органических полимеров ПТФЭ выделяется высокой нагревостойкостью (около 300 °С) и очень высокой стойкостью к действию химических реагентов. Так, на него совершенно не действуют серная, соляная,

азотная и плавиковая кислоты, щелочи и т. п. По стойкости к химически активным веществам ПТФЭ превосходит золото и платину. Он негорюч, не растворяется ни в одном из известных растворителей, практически негигроскопичен и не смачивается водой и другими жидкостями.

Высокие нагревостойкость и химическую стойкость политетрафторэтилена по сравнению с углеводородами можно объяснить тем, что атомы фтора более крупные, чем атомы водорода. Поэтому они экранируют углеродный скелет молекулы от внешнего воздействия. Сама оболочка из атомов фтора также проявляет инертность по отношению к внешним воздействиям из-за большой энергии связи фтора с углеродом.

При нагревании до температуры 415 °С ПТФЭ разлагается с выделением ядовитого газа — фтора.

Но даже при этой температуре полимер не переходит в вязкотекучее состояние. Поэтому обычные методы формовки термопластичных масс для ПТФЭ непригодны. Он перерабатывается в изделия методом спекания. Предварительно из порошка формуют изделие путём прессования, а затем проводят спекание при температуре от 360 до 380 °С.

Благодаря малым потерям неполярные полимеры широко применяют в технике высоких и сверхвысоких частот.

Полиэтилен используют в качестве изоляции и оболочек телефонных, телевизионных и высоковольтных силовых кабелей. Полистирол и фторопласт используют как высокочастотные конструкционные материалы. Тонкие плёнки из полипропилена, полистирола и политетрафторэтилена применяют для изготовления высокочастотных конденсаторов и кабелей. Ценным свойством таких плёнок является высокая электрическая прочность (200–250 МВ/м). Ударопрочный полистирол используют для изготовления корпусов электронных устройств [2,6].

2.11 Полярные полимеры

У полярных линейных полимеров из-за асимметрии строения молекул сильно выражена дипольно-релаксационная поляризация. Поэтому они обладают пониженными электроизоляционными свойствами по сравнению с неполярными полимерами, особенно на высоких частотах. Наиболее распространёнными материалами этой группы являются поливинилхлорид, полиэтилентерефталат (лавсан), полиметилметакрилат (органическое стекло) и полиамиды.

Изоляционные свойства полярных линейных полимеров можно охарактеризовать следующими усредненными параметрами:

- диэлектрическая проницаемость — 3 – 6;
- удельное объёмное сопротивление — $10^{11} - 10^{14}$ Ом·м;
- $\operatorname{tg} \delta$ на частоте 10^6 Гц — 0,01 – 0,06;
- электрическая прочность — 15 – 50 МВ/м.

Поливинилхлорид (ПВХ) — твёрдый продукт полимеризации газа винилхлорида $\text{H}_2\text{C}=\text{CHCl}$, представляющего собой этилен, в молекуле которого один атом водорода замещен атомом хлора.

Поливинилхлорид представляет собой вид полимерного продукта, в состав которого входят определенные добавки. Основой этого материала является

этилен и хлорид натрия – компоненты переработки нефтехимического сырья. Технология производства заключается в нагревании основных составляющих до определенной температуры, и превращении их в однородную массу. Затем происходит процесс полимеризации, в результате которого формируются микрогранулы с пористой структурой. После удаления незадействованных компонентов, ПВХ просеивается и просушивается, потом расфасовывается. По внешнему виду — это порошок белого цвета без запаха. На высокотехнологичном оборудовании поливинилхлорид, в конечном итоге, превращается в пластикат или винипласт. Изделия из этих производных отличаются высокой прочностью, повышенными диэлектрическими свойствами, устойчивостью к кислотам, щелочам, минеральным маслам [26].

Благодаря сильным межмолекулярным взаимодействиям поливинилхлорид является материалом жестким и негибким. Для придания эластичности к ПВХ добавляют пластификаторы — органические полярные жидкости с высокой точкой кипения. Введение полярного пластификатора ухудшает электрические свойства полимера.

Полиэтилентерефталат (ПЭТ, лавсан) — это термопластичный полимер, полученный из этиленгликоля и терефталевой кислоты.

ПЭТ (полиэтилентерефталат) – это термопластичный полимер, являющийся самым распространенным среди полиэфиров. ПЭТ материал обладает прозрачностью, высокой прочностью, хорошей пластичностью (причем в нагретом состоянии, и в холодном), химической стойкостью. Данный материал поддается обработке сверлением, пилением, фрезерованием. Все свои характеристики ПЭТ материал сохраняет и при низких температурах, до -40, и при высоких, до +75 градусов [27].

Он обладает значительной механической прочностью и достаточно высокой температурой размягчения. Этот полярный диэлектрик применяют в виде волокон и плёнок.

Полиметилметакрилат (органическое стекло, плексиглас) при действии электрической дуги выделяет газы, помогающие её гашению.

Полиметилметакрилат или полиметилметакрилат (ПММА) или прозрачный пластик — синтетический полимер метилметакрилата — растворяется в собственном мономере, ацетоне, дихлорэтаноле, бензоле и др. Устойчив к действию воды, водных растворов щелочей и неорганических кислот, бензина и масел; слегка изменяет свойства под действием концентрированной серной, азотной, хромовой и разбавленной фтористоводородной кислот. Хорошо обрабатывается режущим инструментом, легко полируется, склеивается и сваривается.

Выпускается главным образом в виде листового материала (плексиглас), который используется в авиационной, судостроительной, автомобильной промышленности, в области волоконно-оптической связи, медицине и др. отраслях промышленности [28].

Полиамиды отличаются особой прочностью и эластичностью. Особенно известен капрон, применяемый в виде волокон, тканей и литых изделий.

Полиамид — это ненатуральный синтетический материал, который только в 60-ых годах стал выделяться как отдельный вид ткани. Тогда же его начали производить в промышленных масштабах. Полиамид также добавляют в другие виды тканей, что придаёт им большую прочность, лёгкость и эффектность. Используют этот материал в широких объёмах для пошива одежды [29].

Поликарбонаты — особо прочные, твёрдые и прозрачные (применяют как основу лазерных и винчестерных дисков).

Поликарбонат – это полимерный листовой материал, который имеет высокие параметры светопрозрачности, ударопрочности и термостойкости. Он также является превосходной альтернативой стеклу, а по некоторым из своих характеристик и вовсе его превосходит.

Поликарбонат обладает обширным температурным диапазоном, что позволяет ему противостоять различным погодным условиям, то есть при критически низкой температуре прочность материала остается неизменной. Также одним из отличительных качеств данного материала является его легкость. Все эти характеристики стали основополагающим фактором обширного применения поликарбоната в строительной отрасли.

Поликарбонат все чаще используется при остеклении различных строительных конструкций и, тем самым, постепенно вытесняет такой хрупкий и тяжелый материал, как стекло [30].

Полярные полимеры, по сравнению с неполярными, характеризуются примерно на два порядка большими потерями и проводимостью. Поэтому они используются как изоляционные и конструкционные материалы в основном на промышленной частоте. На повышенных и высоких частотах (например, в технике связи) их применение ограничено из-за повышенного затухания электрических сигналов.

Поливинилхлоридный пластикат получил широкое применение в производстве монтажных проводов и силовых кабелей благодаря гибкости, достаточной прочности и высокой производительности наложения изоляции. Плёнки из лавсана используют в качестве несущей основы при изготовлении ленты и дисков для магнитной записи, а также для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов и дросселей, рассчитанных на рабочую температуру до 150 °С. Конденсаторы из таких плёнок, по сравнению с бумажными, обладают большей рабочей температурой и меньшими размерами.

Органическое стекло в основном применяется как декоративный материал в электро- и радиоаппаратуре.

Органическое стекло – это синтетический материал из винилового полимера. Имея высокую степень прозрачности, органическое стекло, будучи пластиком, выигрывает перед обычным своей прочностью. То есть, оно безопасно, поскольку не разбивается и не образует острых осколков. При этом имеет все необходимые характеристики для эффективного использования в быту и коммерции. Полимерное оргстекло пропускает до 93 % света. Имеет высокую плотность, прочность, упругость, устойчивость к возгоранию. Основные отличия органического стекла кроются в легкости его обработки. Его можно пилить, фрезеровать, шлифовать без риска деформации. А также материал обладает низким весом, что особенно важно в процессе транспортировки и монтажа. При этом следует остерегаться контакта этого вида стекла со спиртом и ацетоном, так как эти вещества способны нарушить структуру пластика [31].

Капрон, благодаря хорошим термопластичным свойствам и высокой механической прочности, используют в производстве различных конструктивных деталей радиоаппаратуры (корпусы приборов, ручки и кнопки управления, клавиши переключения диапазонов, каркасы индуктивных катушек и т. п.). На основе полиамидов изготавливают эмаль-лаки, образующие прочные эластичные диэлектрические покрытия на металлических проводах.

Полимерные плёнки из-за упорядоченного расположения молекул обладают особо хорошими механическими и электрическими свойствами. Плёнки используют как основу магнитных носителей информации, а также для изоляции конденсаторов, обмоток высоковольтных машин, жил кабелей сверхвысокого напряжения и высокочастотных кабелей связи. Многие плёнки чувствительны к надрыву, поэтому наклеиваются на бумажные подложки.

2.12 Волокнистые изоляционные материалы

Большинство применяемых в электротехнике волокнистых материалов состоят из органического полимера – **целлюлозы**. Это дерево, бумага картон и хлопчатобумажные ткани. Диэлектрическая проницаемость целлюлозы $\epsilon \approx 6$; $\tan \delta \approx 0,02$. Кроме целлюлозы в изоляционных целях используются материалы из шёлковых, искусственных, синтетических, стеклянных и асбестовых волокон. Благодаря упорядоченному строению волокно обладает особой прочностью и гибкостью.

Общим *недостатком* волокнистых материалов является большая гигроскопичность. Поэтому в большинстве случаев волокнистая изоляция пропитана жидкими диэлектриками либо совместно с полимерами образует композиционные материалы [1].

Дерево применяют для изготовления штанг, рукояток, опорных и крепежных деталей масляных трансформаторов, опор линий электропередачи и связи.

Для изготовления электротехнических бумаг и картонов используют щелочную целлюлозу желтоватого цвета, имеющую большую прочность, чем белая кислотная. Выпускают следующие разновидности бумаг:

- кабельную — для изоляции жил силовых кабелей,
- телефонную — для кабелей связи,
- пропиточную — для изготовления гетинакса,
- конденсаторную, микалентную — для подложки микаленты.

Картоны отличаются от бумаг большей толщиной.

Фибру изготавливают из слоёв бумаги, пропитанной раствором хлористого цинка. Применяют в качестве конструкционного дугогасящего материала.

Текстильные материалы применяют для изоляции обмоточных проводов и шин, а также для изготовления лакотканей и текстолитов.

2.13 Электроизоляционные лаки и компаунды

Лаки это растворы смол, битумов и высыхающих масел в летучих растворителях. При сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа полимеризуется, образуя лаковую плёнку. По назначению лаки подразделяют на: пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки служат для увеличения электрической и механической прочности, а также теплопроводности волокнистой изоляции. Путём пропитки лаком изготавливают лакоткани и лакобумаги.

Покровные лаки образуют механически прочную, гладкую, влагостойкую изоляционную плёнку на поверхности диэлектрика или металла.

В полупроводящие лаки, применяемые для выравнивания электрического поля, добавляют сажу.

Клеящие лаки используют, например, для склеивания между собой листочков расщеплённой слюды при изготовлении миканитов или для приклеивания их к бумажным подложкам микаленты.

По составу различают лаки:

- бакелитовые,
- глифталевые,
- кремнийорганические,
- поливинилхлоридные,
- нитроцеллюлозные,
- масляные,
- битумные и др.

Компаундами называют смеси различных изоляционных веществ (смол, битумов и т. д.), которые переходят из жидкого состояния в твёрдое при остывании или благодаря вводимым в них отвердителям. В составе компаунда могут быть пластификаторы, наполнители, разбавители и т. д.

По назначению компаунды делят на две основные группы:

- пропиточные,
- заливочные.

Первыми пропитывают волокнистую изоляцию, а вторые используют для заполнения сравнительно больших полостей и промежутков между различными деталями с целью:

- защиты изоляции от увлажнения;
- увеличения пробивного напряжения;
- улучшения отвода тепла;
- повышения механической прочности.

Различают термопластичные и термореактивные компаунды.

Термопластичные компаунды размягчаются при нагревании и отвердевают при охлаждении. К их числу относятся битумные компаунды, которые представляют собой сложные смеси углеводородов.

Термореактивные компаунды необратимо отверждаются в результате химических реакций. Они, как правило, обладают более высокой нагревостойкостью по сравнению с термопластичными компаундами, так как при нагревании уже не размягчаются. Однако заливка термореактивным компаундом практически исключает возможность ремонта детали или прибора в случае их повреждения. К числу термореактивных относятся компаунды на основе полиэфирных, кремнийорганических и эпоксидных смол. Эпоксидные компаунды обладают малой усадкой при затвердевании, исключительной прочностью и весьма высокими влагозащитными свойствами.

Компаунды широко применяют для пропитки и заливки отдельных узлов электро- и радиоаппаратуры: трансформаторов, дросселей, конденсаторов. Их используют также для герметизации и опрессовки дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Некоторые разновидности эпоксидных компаундов обладают высокой оптической

однородностью и прозрачностью к излучению в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, благодаря чему находят применение в качестве корпусов светодиодов.

2.14 Композиционные пластмассы и слоистые пластики

Композиционные пластмассы, предназначенные для изготовления изделий методом горячего прессования или литья под давлением, состоят из связующего вещества — полимера и наполнителей (древесная мука, очесы хлопчатника, каолин, кварцевый песок, асбестовое или стеклянное волокно и т. д.), а также красителей и пластификаторов. Исходное сырье тщательно измельчается и перемешивается. Прессование изделий из пластмасс обычно производят на гидравлических прессах, обеспечивающих создание достаточно большого давления. Если требуется одновременно нагрев и давление, то пластины пресса или сама пресс-форма снабжаются электронагревательным устройством. Изделия из термореактивных пластмасс формуются путём прессования, для получения изделий из термопластичных пластмасс применяют литье под давлением.

В качестве связующего вещества используют соединения фенола, крезол, анилина, карбамида и меламина с формальдегидом, а также кремнийорганические и другие смолы.

Использование кремнийорганических смол позволяет получить пластмассы с нагревостойкостью 300 °С и более.

На основе различных смол с разными наполнителями выпускают десятки марок порошков для производства деталей радиоэлектронной аппаратуры. Наполнитель удешевляет пластмассу, и в то же время улучшает механические характеристики изделия. В ряде случаев при введении наполнителя (например, кварцевой муки, талька и др.) наблюдается улучшение электрических свойств диэлектриков.

Широкое применение для изготовления изоляционных плат, в том числе и для печатного монтажа, нашли слоистые пластики — гетинакс и текстолит.

Гетинакс изготавливают из слоёв бумаги, пропитанной спиртовым или водноспиртовым раствором резольной фенолформальдегидной смолы.

Гетинакс — это современный слоистый пластик, созданный на основе бумаги и нескольких видов смол. Этот материал очень устойчив к различного рода химическим воздействиям, поэтому его часто используют в качестве изолятора.

Согласно общепринятой классификации, принято выделять два вида гетинакса — электротехнический и декоративный [32].

Пропитанные листы бумаги сушат, собирают в пакеты и прессуют при температуре 150–160 °С, затем охлаждают под давлением. Слоистое строение гетинакса приводит к анизотропии (это свойство материала, которое позволяет ему изменять или приобретать различные свойства в разных направлениях) свойств. Вдоль слоёв удельное объёмное сопротивление гетинакса в 50–100 раз, а электрическая прочность в 5–8 раз ниже, чем поперек. Перпендикулярно слоям электрическая прочность составляет около 30 МВ/м, $\epsilon = 6 \dots 7$, а $\text{tg} \delta = 0,04 \dots 0,08$ (на частоте 10^6 Гц). Гетинакс относится к числу сильнополярных диэлектриков, так как волокнистая основа и пропитка обладают полярными свойствами.

Текстолит — слоистый пластик, аналогичный гетинаксу, но при его изготовлении используют хлопчатобумажную ткань, либо ткани из синтетических волокон. Если в качестве наполнителя использовать ткань из стеклянных волокон, то получим материал под названием стеклотекстолит, а если асбест — асботекстолит. Связующим веществом в этих материалах служат эпоксидные или полиэфирные смолы.

Текстолит — это слоистый материал, получаемый путем прессовки нескольких слоев хлопчатобумажной ткани. Сама ткань — популярный и востребованный материал, который применяется на разных типах производства, отличаясь в показателях прочности. Материалом для изготовления текстолита служат следующие ткани: бязь, шифон и хлопок [33].

Для изготовления печатных плат на гетинакс и текстолит (стеклотекстолит) с одной или с двух сторон приклеивают тонкие слои медной фольги толщиной 0,035–0,05 мм. Требуемый рисунок печатной схемы получают путём её травления в растворе хлорного железа.

2.15 Эластомеры

Эластомеры — это материалы на основе каучука (натурального или синтетического). Чистый каучук практически неполярен, его удельное сопротивление $\rho \approx 10^{14}$, $\varepsilon = 2,4$, $\operatorname{tg} \delta = 0,002$. При добавлении серы и нагревании происходит вулканизация каучука. Если серы 1–3 % получают мягкую резину, если 30 % и более — эбонит. Резины применяют для изоляции гибких проводов, шнуров и кабелей, а также для защитных перчаток, галош, ковриков.

Эластомеры — это полимерные материалы, имеющие высокоэластичные свойства, то есть обладающие способностью удлиняться при растяжении, в несколько раз превышая первоначальную длину, и при снятии напряжения возвращаться к исходному размеру и форме. Иногда в обиходе эластомеры называют резинами [34].

У **обычных электроизоляционных резин**, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 3 \dots 7$, $\operatorname{tg} \delta = 0,02 \text{--} 0,1$, $\rho \approx 10^{13}$, $E_{np} = 20 \text{--} 30$ МВ/м. Для защиты от старения под действием света в состав резины вводят сажу, что ухудшает её электрические свойства, однако защищает от разрушающего воздействия солнечных лучей. Чёрная резина применяется для оболочек кабелей.

Из **бутадиенового каучука**, при нагреве до 200–300 °С без добавки вулканизирующих веществ получают **эскапон** (синтетический каучук Пономарёва), который имеет высокие электроизоляционные свойства: $\rho \approx 10^{15}$; $\varepsilon = 2,7 \text{--} 3$; $\operatorname{tg} \delta = 0,0005$.

Хлоропеновый каучук (наирит, неопрен), отличается стойкостью к действию масла и бензина и озона и других окислителей, а также не поддерживает горения. Он используется для защитных оболочек кабелей.

Кремнийорганические (силиконовые) каучуки отличаются высокой нагревостойкостью (до 250 °С), устойчивостью к дуге и скользящим разрядам. Применяются для покрытия стеклопластиковых изоляторов. Недостатками силиконовых каучуков являются горючесть и невысокая механическая прочность.

2.16 Стёкла

Стекла это неорганические квазиаморфные системы окислов [1].

Благодаря высокой химической устойчивости, а также дешевизне и доступности сырьевых компонентов, наибольшее распространение получили силикатные стекла (т. е. на основе диоксида кремния SiO_2). Для придания определенных свойств, а также из технологических соображений в состав силикатных стёкол вводят оксиды различных металлов.

Сырьем для изготовления стёкол служат следующие материалы: кварцевый песок SiO_2 , сода Na_2CO_3 , поташ K_2CO_3 , известняк CaCO_3 , доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, сульфат натрия Na_2SO_4 , бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, борная кислота H_3BO_3 , сурик Pb_3O_4 , полевого шпат $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$ и другие компоненты.

Сырьевые материалы измельчают, отвешивают в нужных соотношениях и тщательно перемешивают; полученную при этом шихту загружают в стекловарочную печь. В крупном производстве применяют ваннные печи, а для получения небольшого количества, стекла с точно выдержанным составом – горшковые печи. При нагреве шихта плавится, летучие составные части (H_2O , CO_2 , SO_3) из нее удаляются, а оставшиеся оксиды химически реагируют между собой, в результате чего образуется однородная стекломасса, которая и идет на выработку листового стекла или стеклянных изделий.

Лучшие оптические стёкла варят токами высокой частоты.

Формовку изделий из стекла осуществляют путём выдувания, центробежного литья, вытяжки, прессования, отливки и т.п. Необходимо отметить, что стеклообразное состояние материала получается лишь при быстром охлаждении стекломассы. В случае медленного охлаждения начинается частичная кристаллизация, стекло теряет прозрачность и механическую прочность [1].

Изготовленные стеклянные изделия подвергают отжигу, чтобы устранить опасные местные механические напряжения, возникшие при быстром и неравномерном остывании стекла, для чего изделие нагревают до высокой температуры, а затем медленно охлаждают.

Кварцевое стекло получают из чистой двуокиси кремния при температурах выше 1700°C . Такая стекломасса обладает очень узким интервалом размягчения и даже при температурах выше 1700°C характеризуется высокой вязкостью. Поэтому из нее удастся получить изделия только простейшей конфигурации.

Кварцевое стекло обладает рядом замечательных свойств. Оно имеет наименьшее значение температурного коэффициента линейного расширения из всех известных веществ вообще. Высокая механическая прочность в сочетании с малым температурным коэффициентом линейного расширения обуславливают высокую стойкость кварцевого стекла к тепловым импульсам. Нагретое докрасна кварцевое стекло можно погружать в холодную воду, не вызывая его разрушения. Благодаря высокой нагревостойкости и химической инертности к действию большинства реактивов кварцевое стекло получило широкое применение в технологии производства чистых веществ в качестве конструкционного материала — реакторы, ампулы, лодочки, тигли и т. п.

Кварцевое стекло отличается высокой прозрачностью для излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра вплоть до длины волны порядка 4 мкм. Поэтому оно является ценным оптическим материалом; из него изготавливают линзы, призмы, оптические окна, баллоны ламп ультрафиолетового излучения и др. По электрическим свойствам кварцевое стекло относится к очень хорошим высокочастотным диэлектрикам ($\epsilon=3,8$; $\rho>10^{16}$ Ом·м; $\tan\delta=0,0002$ на частоте 10^6 Гц) [1].

Кратковременная электрическая прочность стёкол при электрическом пробое очень велика и в некоторых случаях может достигать 500 МВ/м. Пробой стёкол имеет тепловой характер [2].

Классификация стёкол по техническому назначению.

1. **Электровакuumные.** Определяющим параметром стёкол для изготовления из них баллонов электровакuumных приборов является температурный коэффициент линейного расширения. Он имеет очень важное значение при впайке металлической проволоки или ленты в стекло. По этому признаку электровакuumные стёкла подразделяют на «платиновые», «молибденовые» и «вольфрамовые». Названия определяются не составом стекла, а только тем, что значения α этих стёкол близки к α платины, молибдена, вольфрама. Для высокочастотных приборов используют стекла с низкими диэлектрическими потерями.
2. **Изоляторные.** Стёкла легко металлизуются и используются в качестве герметизированных вводов в металлические корпуса различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов) в виде стеклянной бусы, изолирующей металлические выводы прибора от фланца корпуса.
3. **Цветные.** Обычные силикатные стёкла прозрачны для излучения в видимой части спектра. Некоторые добавки придают стеклам соответствующую окраску:

CaO – синюю, Cr_2O_3 – зеленую, UO_3 – желтую и т. д., что используется при изготовлении цветных стёкол, светофильтров, эмалей и глазурей.

Стекло может быть использовано в качестве рабочего тела в твёрдотельных лазерах. Генерирующими центрами являются активные ионы, равномерно распределенные в диэлектрической прозрачной «матрице». В практике наиболее часто применяют баритовый крон ($\text{BaO} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$), активированный ионами неодима Nd^{3+} .

Из расплавленной стекломассы методом вытяжки через фильеру с последующей быстрой намоткой на вращающийся барабан можно получать тонкое стекловолокно, обладающее хорошей гибкостью и повышенной механической прочностью.

Весьма тонкие стеклянные волокна (диаметром 4–7 мкм) имеют настолько высокую гибкость, что могут обрабатываться способами текстильной технологии. Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных волокон, ткнут стеклянные ткани, ленты и шланги. Преимуществами стеклянной волокнистой изоляции перед изоляцией из органических волокон являются высокая нагревостойкость, значительная механическая прочность, относительно малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства. Для производства

стекловолокна используют щелочные алюмосиликатные, бесщелочные алюмоборосиликатные стекла.

Тонкие стеклянные волокна используют как световоды для передачи света между источником и приёмником излучения. Отдельные волокна могут быть соединены в световые кабели (жгуты) с внутренними межволоконными светоизолирующими покрытиями. Совокупность методов и средств передачи световой информации с помощью тончайших волокон получила название волоконной оптики, которая является важной составной частью оптоэлектроники.

Волоконные устройства имеют ряд преимуществ перед линзовыми. Они отличаются компактностью и надёжностью. С их помощью можно осуществить поэлементную передачу изображения с достаточно высокой разрешающей способностью, причём передача изображения возможна по искривленному пути. Существенным моментом является скрытность передачи информации и высокая помехозащищённость оптического канала связи, в котором сами волокна играют роль световодов, т. е. служат направляющими системами — канализируют свет от источника к приёмнику информации. Направляющее действие волокон достигается за счёт эффекта многократного полного внутреннего отражения. С помощью волоконных жгутов легко осуществить преобразование оптического изображения, его кодирование и дешифровку. Световые кабели из волокон с коническим сечением могут усиливать освещённость объектов за счёт концентрации светового потока, уменьшать или увеличивать изображение [1].

Специальные технологические приемы (осаждение плёнок на подложку, ионное легирование, ионный обмен) позволяют изготовить плоские световоды для оптических интегральных схем.

Ситаллы — это стеклокристаллические материалы, получаемые путём почти полной стимулированной кристаллизации стёкол специально подобранного состава. Они занимают промежуточное положение между обычными стёклами и керамикой. Ситаллы отличаются от стёкол тем, что в основном имеют кристаллическое строение, а от керамики — значительно меньшим размером кристаллических зёрен [24].

По внешнему виду ситаллы представляют собой плотные материалы от белого и светлорозового до коричневого цвета. Они отличаются повышенной механической прочностью, могут иметь как очень маленький, так и большой коэффициент линейного расширения, высокую теплопроводность и удовлетворительные электрические характеристики. По техническому назначению ситаллы можно подразделить на установочные и конденсаторные. Установочные ситаллы широко используют в качестве подложек гибридных интегральных микросхем и дискретных пассивных элементов (например, тонкоплёночных резисторов). Достоинством ситалловых конденсаторов являются повышенная электрическая прочность по сравнению с керамическими [1].

2.17 Керамика

Керамическим диэлектрикам присущи многие положительные свойства: высокая нагревостойкость, отсутствие у большинства материалов

гигроскопичности, хорошие электрические характеристики при достаточной механической прочности, стабильность характеристик и надёжность, стойкость к воздействию излучения высокой энергии, развитию плесени и поражению насекомыми. Сырьё для производства основных керамических изделий доступно и дёшево. Преимуществом керамики является возможность получения заранее заданных характеристик путём изменения состава массы и технологии обжига [24].

Керамический материал состоит из двух фаз — кристаллической и стекловидной.

Кристаллическую фазу образуют различные химические соединения или твёрдые растворы этих соединений.

Основные свойства керамики:

- диэлектрическая проницаемость,
- диэлектрические потери,
- температурный коэффициент линейного расширения

Стекловидная фаза представляет собой прослойки стекла, связывающие кристаллическую фазу. Технологические свойства керамики (температура спекания, степень пластичности керамической массы при формовании) определяются в основном количеством стекловидной фазы. От её содержания зависят также механическая прочность, плотность, степень пористости и гигроскопичность материала. Некоторые виды радиокерамики вообще не содержат стекловидной фазы.

Наличие газов в закрытых порах приводит к снижению механической и электрической прочности керамических изделий, а также вызывает диэлектрические потери при повышенной напряжённости поля вследствие их ионизации [1].

Технологическая, схема керамического производства включает в себя следующие операции:

- тонкое измельчение и тщательное смешивание исходных компонентов;
- пластификация массы и образование формовочного полуфабриката;
- формование заготовок из пластифицированной массы;
- высокотемпературный обжиг.

В процессе обжига происходит усадка изделий, т. е. уменьшение их размеров, поэтому допуски на размеры керамических изделий, особенно крупногабаритных, сравнительно велики (до 5 %).

По техническому назначению керамические диэлектрические материалы можно подразделить на установочные и конденсаторные [10].

Установочную керамику применяют:

- для изготовления разного рода изоляторов и конструктивных деталей;
- опорных, проходных, подвесных, антенных изоляторов радиоустройств, подложек интегральных микросхем, ламповых панелей, внутриламповых изоляторов;

- корпусов резисторов, каркасов индуктивных катушек, оснований электрических печей и др.

Из керамики изготавливают свыше 50 % всех конденсаторов.

По электрическим свойствам установочную и конденсаторную керамику подразделяют на низкочастотную и высокочастотную.

Из **низкочастотных** установочных материалов наиболее распространён изоляторный фарфор. Сырьем для его изготовления служат специальные сорта глины, кварцевый песок и полевой шпат.

Из-за большого содержания щелочных окислов в стеклофазе материал обладает значительными диэлектрическими потерями на высоких частотах.

Промежуточное положение между высокочастотными и низкочастотными диэлектриками занимает **радиофарфор**.

Улучшение его электрических свойств по сравнению с изоляторным фарфором достигается путём введения в состав исходной шихты оксида бария, резко снижающего диэлектрические потери и проводимость стекловидной фазы. Удельное сопротивление радиофарфора на два порядка выше, чем у изоляторного фарфора.

Дальнейшим усовершенствованием радиофарфора является ультрафарфор, относящийся к группе материалов с высоким содержанием глинозёма (более 80 % Al_2O_3).

Ультрафарфор является высокочастотным диэлектриком, в котором сочетаются низкие диэлектрические потери с высокой механической прочностью и удовлетворительными для промышленного производства технологическими параметрами.

Корундовая керамика с содержанием глинозёма 95–99 % получила название **алюминоксида**.

Этот материал отличается низкими диэлектрическими потерями в диапазоне радиочастот, и при повышенных температурах обладает весьма высокой нагревостойкостью (до 1600 °С), а также большой механической прочностью и хорошей теплопроводностью. Удельная теплопроводность алюминоксида в 10–20 раз выше, чем изоляторного фарфора. Керамика из алюминоксида используется в качестве изоляторов в корпусах полупроводниковых приборов и подложек интегральных микросхем.

Разновидностью алюминоксида является **поликор**, обладающий особо плотной структурой. В отличие от обычной корундовой керамики поликор прозрачен, поэтому его применяют для изготовления колб некоторых специальных источников света.

Керамика **брокерит** на основе оксида бериллия BeO обладает наиболее высокой теплопроводностью среди всех неметаллических материалов. К тому же она имеет высокие электрические параметры: $\rho=10^{16}$ Ом·м, $\text{tg}\delta<3\cdot10^{-4}$ (на частоте 1 МГц). Брокеритовую керамику применяют для подложек интегральных микросхем и в особо мощных приборах СВЧ.

Недостатком этого материала является токсичность порошкообразного BeO , что требует соблюдения строгих мер техники безопасности на всех этапах технологического цикла изготовления керамических изделий.

Цельзиановую керамику используют для изготовления каркасов высокостабильных индуктивных катушек, изоляторов и высокочастотных конденсаторов большой реактивной мощности.

Характерными особенностями цельзиановой керамики является повышенная по сравнению с другими керамическими материалами электрическая прочность (до 45 МВ/м) и сравнительно небольшая механическая прочность.

Стеатитовую керамику получают на основе природного минерала – талька, который отличается высокой пластичностью. Преимуществами стеатитовой керамики являются её малая абразивность и незначительная усадка при обжиге (1,0–1,5 %). Поэтому из нее можно изготавливать мелкие детали с повышенной точностью размеров.

Стеатит применяют в качестве высокочастотных проходных изоляторов, опорных плат, изолирующих колец, деталей корпусов полупроводниковых приборов, а также в виде пористой вакуумной керамики для внутриламповых изоляторов.

Конденсаторная керамика может иметь диэлектрическую проницаемость с повышенным ($\epsilon=10-230$) и высоким ($\epsilon>900$) значениями. В первом случае, при частоте 1 МГц, $\text{tg}\delta$ не превышает 0,0006, т. е. керамика принадлежит к высокочастотным диэлектрикам, во втором, при частоте 1000 Гц, $\text{tg}\delta=0,002-0,025$, и такую керамику относят к низкочастотным диэлектрикам.

Конденсаторную керамику используют соответственно для производства низкочастотных и высокочастотных конденсаторов низкого и высокого напряжений. Желательно, чтобы все конденсаторные материалы имели малую зависимость ёмкости от температуры.

Специальными материалами для высокочастотных конденсаторов являются «титанатовые» керамические диэлектрики (тиконды).

Керамика с большим содержанием рутила или титанатов кальция и стронция характеризуется пониженной электрической прочностью (8–12 МВ/м), подвержена электрохимическому старению при длительной выдержке под постоянным напряжением и не обладает температурной стабильностью ϵ . Основу низкочастотной конденсаторной керамики составляют титанат бария и твёрдые растворы с сегнетоэлектрическими свойствами. Благодаря доменной поляризации конденсаторная сегнетокерамика обладает весьма высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon=900 - 8000$), которая, однако, не отличается температурной стабильностью и зависит от частоты и напряжённости электрического поля. Лучшей стабильностью отличаются титаноциркониевая, лантановая и станнатная керамика [25].

2.18 Слюда и слюдяные материалы

Слюда обладает исключительно ценными качествами [25]:

- высокой электрической прочностью,
- нагревостойкостью,
- гибкостью,
- теплопроводностью.

Встречается в природе в виде кристаллов, легко расщепляющихся на пластинки. Водные алюмосиликаты — **мусковит** $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ и **флогопит** $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. Кроме того, в состав слюды могут входить соединения железа, натрия, кальция и др. Мусковиты бесцветные или имеют оттенки — красноватый, зеленоватый и др., по электрическим и механическим свойствам лучше. Флогопиты тёмные — янтарные, золотистые, коричневые до чёрных, но встречаются и светлые. Наилучшие электрические свойства — перпендикулярно слоям. Применяется для изоляции мощных высоковольтных электрических машин и высоковольтных высокочастотных конденсаторов. При нагреве до нескольких сотен градусов из слюды выходит кристаллическая вода, она вспучивается и теряет прозрачность, электрические и механические свойства ухудшаются.

Кроме пластин самой слюды применяют материалы на её основе: миканиты, слюдиниты, слюдопласты, микалекс.

Миканиты — листовые материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы. Их используют в качестве различных изоляционных прокладок. Например, между коллекторными пластинами электродвигателей. Пластины миканита используют также в качестве конструктивных изоляционных элементов, например, внутри электронновакуумных приборов.

При изготовлении микаленты на подложку из стеклоткани или особо прочной бумаги с двух сторон приклеивают пластинки слюды с перекрытием. Из отходов слюды с использованием различных связующих изготавливают слюдинитовые и слюдопластовые бумаги. Микалекс — это пластмасса, в которой наполнитель — отходы слюды, а связующее — легкоплавкое стекло.

Синтетическая слюда **фторфлогопит** применяется для изготовления штампованных деталей, способных работать при температуре от минус 200 до плюс 800 °С. В её структуре атомы кислорода частично заменены на атомы фтора.

2.19 Асбест и асбестовые материалы

Асбест — название группы минералов, обладающих волокнистым строением. Хризотилвый $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Залегают в каменных породах в виде жил, состоящих из параллельных друг другу волокон (горный лён). Длина волокон асбеста достигает нескольких сантиметров. Нагревостойкость асбеста превышает 400 °С [25].

Из асбеста изготавливают пряжу, ленты, ткани, бумаги, картоны и другие изделия. Ленты из асбеста с высоким содержанием магнетита используют в электрических машинах высокого напряжения для улучшения картины электрического поля. В качестве наполнителя асбест входит в состав термостойких пластмасс. Из него изготавливают асбогетинакс, асботекстолит.

Асбоцемент — материал холодной прессовки, в котором наполнителем является асбест, а связующим — цемент, применяется для распределительных щитов, искрогасящих камер, труб кабельной канализации. Следует помнить о канцерогенности асбеста.

2.20 Неорганические диэлектрические плёнки

Оксидные плёнки на поверхности некоторых металлов, в частности алюминия, широко применяются в качестве изоляции электролитических конденсаторов. Диэлектрическая проницаемость оксида алюминия около 10. Более перспективны танталовые (ϵ около 27) и ниобиевые (ϵ примерно 40) оксидные конденсаторы. Толщину оксидных плёнок можно наращивать с помощью химических и электрохимических процессов [2].

Из оксидированного алюминия изготавливают также различные катушки без дополнительной межвитковой и межслойной изоляции. Недостатками оксидной изоляции является её малая гибкость и заметная из-за пористости плёнки гигроскопичность. Если не требуется особая нагревостойкость, оксидную изоляцию можно пропитать и покрыть лаком. Температура плавления оксида алюминия 20–50 °С.

Оксидные плёнки кремния используют в качестве изоляции в микросхемах. Оксид гафния наилучший материал для изоляционных подложек и плёнок нанoeлектронных устройств.

2.21 Нагревостойкость электроизоляционных материалов

По наибольшей температуре длительной эксплуатации электроизоляционных материалов их подразделяют на 7 классов нагревостойкости:

- **Y** (до 90 °С) — волокнистые материалы на основе целлюлозы и шёлка (пряжа, ткани, бумаги, картоны, древесина), а также большинство термопластичных полимерных материалов;
- **A** (до 105 °С) — материалы из органических волокон, пропитанных лаками, компаундами либо погруженных в жидкий диэлектрик, а также полиамиды и поливинилацетаты;
- **E** (до 120 °С) — термореактивные полимерные материалы, а также полиэфир, полиуретан и эпоксидные смолы;
- **B** (до 130 °С) — материалы с большим содержанием неорганических компонентов и органическими связующими;
- **F** (до 155 °С) — неорганические вещества с эпоксидными, кремнийорганическими и термореактивными связующими повышенной нагревостойкости;
- **H** (до 180 °С) — материалы, получаемые при использовании кремнийорганических смол особо высокой нагревостойкости;
- **C** (выше 180 °С) — чисто неорганические материалы, а также фторопласт и полиимиды.

ТЕМА 3. АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Диэлектрики, электрическими и оптическими свойствами которых можно управлять с помощью электрических, магнитных, световых, тепловых и механических воздействий, называют **активными** [35].

В отличие от пассивных диэлектриков, от которых требуется стабильность свойств, требования к активному материалу совершенно противоположные: чем сильнее изменяются его свойства при внешних воздействиях, тем лучше активный элемент может выполнять функции управления энергией или преобразования информации [1].

Активные диэлектрики позволяют осуществить генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, а также запоминание и преобразование информации. Следует отметить, что резкой границы между активными и пассивными диэлектриками не существует. Иногда один и тот же материал в различных условиях его эксплуатации может выполнять либо пассивные функции изолятора или конденсатора, либо активные функции управляющего или преобразующего элемента.

К числу активных диэлектриков относят:

- сегнето-, пьезо- и пирозлектрики;
- электреты;
- материалы лазерной электроники;
- жидкие кристаллы;
- электро-, магнито- и акустооптические материалы;
- диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и другие материалы.

Свойствами активных диэлектриков могут обладать не только твёрдые, но также жидкие и даже газообразные вещества (например, активная среда газовых лазеров). По химическому составу это могут быть органические и неорганические материалы. По строению и свойствам активные диэлектрики можно подразделить на кристаллические и аморфные, полярные и неполярные. Из всего многообразия активных диэлектриков в настоящем разделе рассмотрены лишь те, которые нашли широкое практическое применение.

3.1 Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектриками называют вещества, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией. Это значит, что отдельные участки их структуры имеют собственные электрические моменты (мера разделения положительных и отрицательных электрических зарядов внутри системы, то есть мера общей полярности системы), вызванные смещением ионов или полярных групп атомов [2]. При этом моменты соседних участков взаимно ориентируются в одном направлении в пределах макроскопической области, **называемой доменом**. Направления электрических моментов у разных доменов различны, поэтому суммарная поляризованность образца в целом может быть равна нулю. Внешнее электрическое поле изменяет направления электрических моментов доменов, что создает эффект очень сильной поляризации. Этим объясняются свойственные сегнетоэлектрикам

сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости (до сотен тысяч). Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость их электрической индукции от напряжённости электрического поля, а также петля электрического гистерезиса (реакция предмета, поверхности или целой системы на воздействие со стороны некоего раздражителя) на кулон-вольтной характеристике [1].

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация достаточно широко распространена. В настоящее время известно несколько сотен химических соединений, в том числе и твёрдых растворов, обладающих свойствами сегнетоэлектриков. Температура перехода в спонтанно поляризованное состояние (точка Кюри) у различных сегнетоэлектриков составляет от нескольких кельвинов (например, у ниобата свинца $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ $T_K = 15 \text{ K}$) до полутора тысяч кельвинов (например, у ниобата лития LiNbO_3 $T_K = 1483 \text{ K}$), а спонтанная поляризованность находится в пределах от 10^{-5} до 3 Кл/м^2 .

Вещества, электрические моменты соседних участков которых направлены встречно (антипараллельно), называют антисегнетоэлектриками. В их кристаллах электрические моменты соседних элементарных ячеек оказываются уравновешенными, следовательно, спонтанная поляризованность каждого домена равна нулю. Однако при нагреве выше температуры Кюри это равновесие нарушается и антисегнетоэлектрики могут обладать высокой диэлектрической проницаемостью. Примерами антисегнетоэлектриков являются цирконат свинца PbZrO_3 , ниобат натрия NaNbO_3 , дигидрофосфат аммония $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ и др.

Структура сегнетоэлектрических кристаллов разнообразна. По типу химической связи и строению все сегнетоэлектрики подразделяют на ионные и дипольные [1].

У ионных сегнетоэлектриков характерным структурным элементом кристаллической решётки является кислородный октаэдр, внутри которого компактный атом титана или иного элемента может занимать несколько устойчивых положений. К ионным сегнетоэлектрикам относятся титанат бария BaTiO_3 , титанат свинца PbTiO_3 , ниобат калия KNbO_3 , ниобат лития LiNbO_3 , танталат лития LiTaO_3 , йодат калия KIO_3 , барийнатриевый ниобат $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ или сокращенно – «банан» и др.

У кристаллов дипольных сегнетоэлектриков имеются готовые полярные группы атомов, способные занимать различные положения равновесия. К дипольным сегнетоэлектрикам относятся [35]:

- сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,
- триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{SO}_4$,
- дигидрофосфат калия KH_2PO_4 ,
- нитрит натрия NaNO_2 и др.

Именно в кристаллах сегнетовой соли впервые были обнаружены особенности поведения диэлектриков, обусловленные спонтанной поляризацией. Отсюда произошло название всей группы материалов со специфическими свойствами — сегнетоэлектрики.

Ионные и дипольные сегнетоэлектрики существенно различаются по физическим свойствам и особенностям применения.

3.2 Применение сегнетоэлектриков

В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых следует считать [2]:

- изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной ёмкостью;
- использование нелинейности поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств;
- использование сегнетоэлементов в счётно-вычислительной технике в качестве ячеек памяти;
- использование кристаллов сегнето- и антисегнетоэлектриков для модуляции и преобразования лазерного излучения;
- изготовление пьезо- и пироэлектрических преобразователей.

Конденсаторная сегнетокерамика, как и любой диэлектрик, для производства обычных конденсаторов должна иметь большую величину диэлектрической проницаемости с малой зависимостью от температуры, незначительные потери, небольшую зависимость ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ от напряжённости электрического поля (малую нелинейность), высокие значения удельного сопротивления и электрической прочности. Вблизи точки Кюри диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика максимальна, но нестабильна [1].

Одним из важнейших методов получения оптимальных свойств в заданном температурном интервале является использование твёрдых растворов и смесей различных кристаллов. Изменением концентрации компонентов в твёрдом растворе можно регулировать значения диэлектрической проницаемости, смещать температуру Кюри (рисунок 3.1), изменять нелинейность поляризации и т. д. [2].

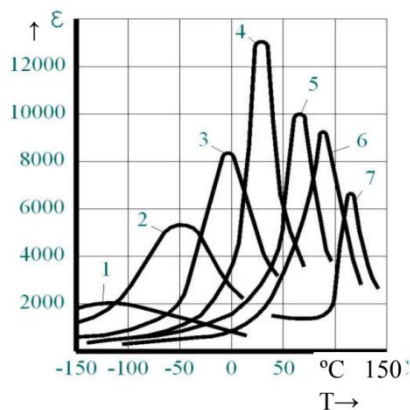


Рисунок 3.1 — Графики зависимости ϵ твёрдых растворов $\text{BaTiO}_3 + \text{BaZrO}_3$ от температуры при $f = 1$ кГц:

1 – 60 ° BaTiO_3 ; 2 – 70 °; 3 – 75 °; 4 – 80 °; 5 – 85 °; 6 – 90 °; 7 – 100 °

В твёрдых растворах, по сравнению с простыми веществами, можно получить более сглаженные температурные зависимости ϵ , что имеет важное значение для производства конденсаторов. В большинстве случаев конденсаторные сегнетокерамические материалы содержат несколько кристаллических фаз. При «размытом» фазовом переходе нелинейные свойства диэлектриков выражены сравнительно слабо.

Графики зависимости диэлектрической проницаемости ϵ от температуры для некоторых сегнетокерамических материалов, применяемых при изготовлении малогабаритных конденсаторов различных типов, приведены на рисунке 3.2 [1].

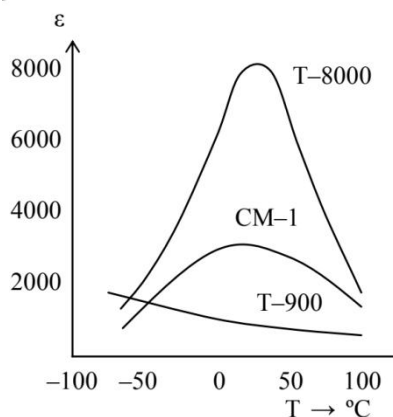


Рисунок 3.2 — Зависимость ϵ конденсаторной сегнетокерамики от температуры

Материал T900 ($\epsilon \approx 900$) представляет собой твердый раствор титанатов стронция SrTiO_3 и висмута $\text{Bi}_4\text{TiO}_{12}$. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры выражена слабо, т. к. точка Кюри $t_k = -140^\circ\text{C}$ расположена в области отрицательных температур.

Материал CM1 (ϵ около 3000) на основе титаната бария с добавкой окислов циркония и висмута, обладает сглаженной зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры. Из него изготавливают низковольтные малогабаритные конденсаторы.

Материал T8000 (ϵ около 8000) для изготовления конденсаторов, в том числе и высоковольтных, работающих в нешироком интервале температур. Представляет собой твердый раствор $\text{BaTiO}_3 + \text{BaZrO}_3$. Отличается высоким значением диэлектрической проницаемости при комнатной температуре (вблизи точки Кюри).

Материалы для варикондов. Вариконды предназначены для управления параметрами электрических цепей за счёт изменения их ёмкости при воздействии нескольких напряжений, приложенных одновременно и различающихся по значению и частоте [2].

В простейшем случае им приходится работать при одновременном воздействии постоянного и переменного (синусоидального) электрических полей, причём $E \gg E_{\sim}$.

Одна из основных характеристик варикондов — коэффициент нелинейности K , определяемый как отношение максимального значения диэлектрической проницаемости при некоторой, характерной для данного материала напряжённости электрического поля к начальному значению диэлектрической проницаемости. Численное значение коэффициента нелинейности для различных марок варикондов может быть от 4 до 50.

Нелинейные конденсаторы, обычно в тонкоплёночном исполнении, являются основой разнообразных радиотехнических устройств — параметрических усилителей, низкочастотных усилителей мощности,

фазовращателей, умножителей частоты, модуляторов, стабилизаторов напряжения, управляемых фильтров и других устройств. Основной кристаллической фазой в таких материалах являются твёрдые растворы $\text{Ba}(\text{Ti}+\text{Sn})\text{O}_3$ или $\text{Pb}(\text{Ti}+\text{Zr}+\text{Sn})\text{O}_3$.

Сегнетоэлектрики с ППГ. Благодаря диэлектрическому гистерезису сегнетоэлектрики можно применять для запоминания информации. Здесь необходим материал с возможно более прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), что характерно, например, для монокристаллов триглицинсульфата (ТГЦ) — $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ [3].

В отсутствие внешнего поля сегнетоэлектрик с ППГ имеет два устойчивых состояния, соответствующих различным направлениям остаточной электрической индукции. Одно из этих состояний в запоминающей ячейке означает хранение единицы, а другое — хранение нуля. Подавая внешнее напряжение различной полярности, сегнетоэлектрик можно переводить из одного состояния в другое. На этом основаны запись, считывание и стирание информации. Считывание информации можно осуществить без её разрушения, например, оптическим методом или измерением сопротивления тонкой полупроводниковой плёнки, нанесенной на поверхности сегнетоэлектрика. Время переключения ячейки из сегнетоэлектрического монокристалла зависит от его размера и при толщине в несколько десятых долей миллиметра составляет несколько микросекунд [1].

В сегнетокерамике процесс переполаризации в отдельных зёрнах происходит независимо, и время прорастания доменов определяется размерами зёрен, которые можно уменьшить до нескольких микрометров. В этом случае быстроедействие выше, чем в монокристаллах, хотя прямоугольность петли гистерезиса ухудшается.

3.3 Электрооптические кристаллы

Кристаллы ряда сегнето- и антисегнетоэлектриков обладают ярко выраженным **электрооптическим эффектом**, под которым понимают изменение показателя преломления среды, вызванное внешним статическим электрическим полем. Если изменение показателя преломления пропорционально первой степени напряжённости, то электрооптический эффект называют линейным (или эффектом Поккельса). Если же это изменение пропорционально квадрату напряжённости поля, то электрооптический эффект называют квадратичным (или эффектом Керра) [25].

Электрооптические свойства сегнетоэлектрических кристаллов используются для модуляции лазерного излучения. Разнообразные конструкции электрооптических модуляторов света созданы на базе кристаллов ниобата лития LiNbO_3 , дигидрофосфата калия KH_2PO_4 и его дейтерированного аналога KD_2PO_4 (дидейтерофосфат калия). Весьма перспективно применение в качестве электрооптического материала прозрачной сегнетокерамики системы ЦТСЛ — твёрдые растворы цирконаттитаната свинца с окисью лантана.

Электрооптический эффект усиливается с приближением температуры сегнетоэлектрика к точке Кюри. Здесь возможна эффективная модуляция света небольшими напряжениями.

Материалы нелинейной оптики. При воздействии мощных световых пучков, создаваемых с помощью лазеров, во многих сегнето и антисегнето-электриках проявляются нелинейные оптические эффекты, в основе которых лежит зависимость показателя преломления от напряжённости поля самой световой волны. Нелинейность оптических свойств сегнетоэлектрических кристаллов позволяет осуществить генерацию гармоник лазерного излучения, смешение и преобразование частот оптических сигналов. Большой практический интерес представляет преобразование инфракрасного излучения лазеров (обычно с $\lambda=1,06$ мкм) в видимый свет. Высокую эффективность такого преобразования обеспечивают кристаллы KN_2PO_4 (дигидрофосфат калия), LiNbO_3 (ниобат лития), LiIO_3 (йодат лития), $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (барийнатриевый ниобат, «банан») и др. [35].

3.4 Пьезоэлектрики

К пьезоэлектрикам относят диэлектрики, которые обладают сильно выраженными пьезоэлектрическими эффектами. **Прямой пьезоэлектрический эффект** называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Это изменение может быть продольным и поперечным; возникающий на каждой из поверхностей диэлектрика электрический заряд строго пропорционален механическому усилию. При **обратном пьезоэлектрическом эффекте** происходит изменение размеров диэлектрика под действием электрического поля. Пьезоэлектричество было открыто братьями Кюри в 1880 г. [6].

Пьезоэффекты наблюдаются лишь в веществах с гетерополярной химической связью, т.е. пьезоэлектриками могут быть либо ионные, либо сильнополярные диэлектрики. Вторым необходимым условием существования пьезоэффекта является отсутствие центра симметрии в структуре диэлектрика. В противном случае деформация вызывает симметричное смещение положительных и отрицательных зарядов, и электрический момент не возникает. Пьезоэлектриками могут быть лишь вещества с высоким удельным сопротивлением. В достаточно проводящих средах пьезоэлектрическая поляризация быстро компенсируется свободными носителями заряда. Поскольку любой диэлектрик обладает некоторым током утечки, все применения пьезоэффекта связаны с переменными быстропротекающими процессами.

Известно более тысячи веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, в том числе все сегнетоэлектрики, однако практически применяют ограниченный круг материалов. Важнейшим пьезоэлектриком является монокристаллический кварц, крупные прозрачные кристаллы которого называют «горный хрусталь» [1].

Плоскопараллельная полированная кварцевая пластинка с электродами и держателем представляет собой **пьезоэлектрический резонатор**, т. е. является колебательным контуром. Резонансная частота колебаний зависит от толщины пластины и направления кристаллографического среза. Преимуществами кварцевых резонаторов являются малый $\text{tg}\delta$ и высокая механическая добротность (т. е. очень малые механические потери). В лучших кристаллах кварца механическая добротность может составлять 10^6 – 10^7 . Это обеспечивает

высокую частотную избирательность кварцевых резонаторов. Если в таком резонаторе возбудить колебания на резонансной частоте, то их затухание будет происходить в течение длительного времени. Кварцевый пьезоэлемент, вставленный в схему электрического генератора, навязывает ему собственную резонансную частоту.

Благодаря высокой добротности кварцевые резонаторы используются в качестве фильтров с высокой избирательной способностью, а также для стабилизации и эталонирования частоты генераторов (например, в радиолокационных станциях, в электронных часах и т. п.). Ввиду ограниченных запасов природного кварца основные потребности пьезотехники удовлетворяют искусственно выращиваемыми кристаллами.

Помимо кварца в различных пьезопреобразователях применяют кристаллы сульфата лития $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония, а также ниобат и танталат лития, которые превосходят кварц по добротности в диапазоне высоких частот и СВЧ. Для придания пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3 переводят в монокристаллическое состояние путём отжига в сильном электрическом поле при температуре несколько ниже точки Кюри.

Точка Кюри — это температура, выше которой некоторые материалы теряют свои постоянные магнитные свойства, которые могут (в большинстве случаев) быть заменены индуцированным магнетизмом. Температура Кюри названа в честь Пьера Кюри, который показал, что магнетизм теряется при критической температуре [36].

Наиболее широкое применение в качестве пьезоэлектрического материала находит сегнетоэлектрическая **пьезокерамика**.

В обычном состоянии сегнетокерамика не проявляет пьезоактивности, поскольку является изотропной средой вследствие хаотического расположения отдельных кристаллических зёрен и деления их на домены с различным направлением спонтанной поляризованности. Однако, если подвергнуть сегнетокерамику воздействию сильного электрического поля, то поляризованность доменов получит преимущественную ориентацию в одном направлении. После снятия поля сохраняется устойчивая остаточная поляризованность, материал становится текстурованным. По своим свойствам поляризованный сегнетокерамический образец близок к монокристаллу и обладает высокой пьезоактивностью.

Основным материалом для изготовления пьезокерамических элементов являются твёрдые растворы $\text{PbZrO}_3 + \text{PbTiO}_3$ (цирконаттитанат свинца или сокращенно ЦТС). Эта керамика широко используется для создания мощных ультразвуковых излучателей в широком диапазоне частот для целей гидроакустики, дефектоскопии, механической обработки материалов.

Такие ультразвуковые генераторы применяются также в химической промышленности для ускорения различных процессов (эмульсификаторы, полимеризаторы, стерилизаторы и т. п.) и в полупроводниковой технологии для эффективной отмывки и обезжиривания полупроводниковых пластин с помощью ультразвуковой ванны.

Из пьезокерамики делают малогабаритные микрофоны, телефоны, громкоговорители (высокочастотные), детонаторы (для оружия), различные

устройства поджига в газовых системах. Пьезокерамические элементы можно использовать в качестве датчиков давлений, деформаций, ускорений и вибраций. Двойное преобразование энергии (электрической в механическую и наоборот) положено в основу работы пьезорезонансных фильтров, линий задержки и пьезотрансформаторов.

Пьезотрансформаторы предназначены для получения высокого напряжения. Их обычно выполняют в виде пластины или бруска, одна половина которого (возбудитель колебаний) поляризуется по толщине, а другая половина (генератор) – по длине бруска (рисунок 3.3) [25].

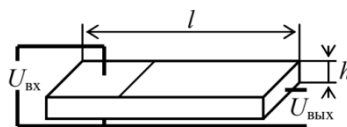


Рисунок 3.3 – Схема высоковольтного пьезоэлектрического трансформатора

Переменное электрическое поле, подводимое к зажимам возбудителя, вызывает резонансные механические колебания по длине бруска. В свою очередь, механические колебания, возникающие в генераторной части, приводят к появлению выходного электрического напряжения. Трансформаторы могут быть изготовлены для работы на частоте 10–500 кГц. На более высоких частотах их размеры оказываются слишком малыми, а на низких — большими.

Коэффициент трансформации напряжения, пропорциональный отношению l/h , может достигать значений 50 и более. Пьезокерамические трансформаторы используют в схемах питания электроннолучевых трубок, газоразрядных приборов, счётчиков Гейгера и для генерирования высоковольтных импульсов. Преимуществами таких источников питания являются отсутствие магнитного поля, простота и надёжность конструкции, малая масса и габариты.

Кроме керамики ЦТС для изготовления различных пьезоэлектрических преобразователей применяют керамические материалы на основе твёрдых растворов $\text{BaNb}_2\text{O}_6 + \text{PbNb}_2\text{O}_6$ и $\text{NaNbO}_3 + \text{KNbO}_3$. Последние разработаны специально для высокочастотных преобразователей (10–40 МГц) [1].

3.5 Пироэлектрики

К **пироэлектрикам** относят диэлектрики, обладающие сильной зависимостью спонтанной поляризованности от температуры.

Каждый участок пироэлектрика можно представить, как конденсатор ёмкостью C (пропорциональной диэлектрической проницаемости ϵ), в котором при напряжении U запасена энергия $W_c = CU^2/2$. При нагреве ϵ и ёмкость C резко уменьшаются, а энергия не может измениться мгновенно, поэтому создаётся импульс напряжения.

Пироэлектрическими свойствами обладают некоторые линейные диэлектрики (например, турмалин, сульфат лития) и все сегнетоэлектрические материалы в монокристаллическом состоянии, для которого характерна одинаковая ориентация спонтанной поляризованности всех доменов.

Значительный пироэффект в сегнетоэлектриках используется для создания тепловых датчиков и приёмников лучистой энергии (это один из механизмов, с помощью которого энергия может входить или выходить из открытой системы).

Пироэффект (от греч. Πῦρ — огонь и лат. Effectus — действие) — яркое свечение, световая вспышка, сопровождающиеся выделением дыма. Пироэффект возникает в результате сгорания или интенсивного испарения материалов, вводимых в жидкий металл, например, испарение Mg при использовании его в качестве сфероидизирующего модификатора чугуна [37].

Такая система может быть искусственной, такой как коллектор солнечной энергии, или естественной, такой как атмосфера Земли. В геофизике большинство атмосферных газов, включая парниковые газы, позволяют коротковолновой лучистой энергии Солнца проходить к поверхности Земли, нагревая землю и океаны), предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и СВЧ-излучения.

Специфическим свойством пироэлектрических фотоприёмников является отсутствие избирательности по спектру излучения. Существенное преимущество их состоит в том, что они не требуют охлаждения при детектировании излучения даже в далекой инфракрасной области спектра. Они обладают достаточно высоким быстродействием (способны работать в частотном интервале до 10 МГц), однако по чувствительности уступают полупроводниковым фотоприёмникам.

Максимальное проявление пироэлектрического эффекта наблюдают в сегнетоэлектриках с точкой Кюри, близкой к комнатной температуре. К их числу относятся кристаллы ниобата бариястронция $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ и триглицинсульфата. Повышенной чувствительностью на высоких частотах характеризуются кристаллы ниобата LiNbO_3 и танталата LiTaO_3 лития. Пиро- и пьезоэлектрические свойства обнаружены у некоторых полимеров, в частности, у поляризованных плёнок поливинилденфторида и поливинилденхлорида, отличающихся простотой технологии изготовления, невысокой стоимостью и малой инерционностью пироэффекта на высоких частотах.

3.6 Электреты

Электретом называют тело из диэлектрика, длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле, т. е. электрет является формальным аналогом постоянного магнита, способным создавать электрическое поле в окружающем пространстве в течение многих месяцев и даже лет. К сожалению, время жизни электретов быстро уменьшается с повышением температуры и влажности окружающей среды. Термин электрет был предложен в 1896 г. английским физиком Хевисайдом, а первые образцы электретов были изготовлены японским исследователем Егучи из охлажденного в сильном электрическом поле расплава полярных диэлектриков: пальмового воска и канифоли в 1922 г.

Большой интерес представляют **фотоэлектреты** из материалов, у которых под воздействием света появляется электропроводность (сера, сульфид кадмия и др.). Фотоэлектреты могут длительно сохранять заряды в темноте и быстро разряжаются при освещении [1].

Обычно электрет имеет вид тонкой пластинки или полимерной плёнки из полиэтилентерефталата, поликарбоната, полиметилметакрилата и др. В условиях повышенной влажности наиболее стабильны электреты из политетрафторэтилена.

Электреты могут быть использованы для изготовления микрофонов и телефонов, измерения механических вибраций, в качестве пылеуловителей, дозиметров радиации, измерителей атмосферного давления и влажности, электрометров, в клавишах вычислительных машин, в электрофотографии и во многих других случаях [1].

3.7 Материалы для твёрдотельных лазеров

Лазер представляет собой источник оптического когерентного излучения, характеризующегося высокой направленностью и большой плотностью энергии [6].

Рабочее тело лазера изготавливают, как правило, в виде цилиндрического стержня, торцевые поверхности которого обрабатываются с высокой степенью точности. Активной средой служит кристаллическая или стеклообразная матрица, в которой равномерно распределены активные ионы (активаторы люминесценции). Все процессы поглощения и излучения света связаны с переходами электронов между уровнями активного иона; при этом матрица играет пассивную роль. Тип активного иона в основном определяет спектр излучения лазера. Оптический резонатор выполняют в виде двух плоскопараллельных зеркал. Одно из них полупрозрачно для вывода излучения из активного элемента. Для возбуждения активных ионов используется оптическая накачка с помощью мощных газоразрядных ламп.

Одним из наиболее освоенных материалов лазерной техники является рубин. Именно на рубине в 1960 г. был создан первый твёрдотельный лазер. Рубинами называют кристаллы α -корунда (Al_2O_3), в которых часть ионов алюминия замещена ионами хрома.

Искусственные кристаллы рубина обычно выращивают в печах по методу Вернейля, при котором тщательно размельченный порошок оксида алюминия с добавкой Cr_2O_3 медленно падает в пламя водороднокислородной горелки. Отдельные частички порошка, проходя через пламя, расплавляются и затем кристаллизуются на затравочном кристалле, помещенном вне пламени. Полученную заготовку отжигают, а потом обрабатывают, придавая ей необходимые форму и размеры. Высококачественные кристаллы рубина могут быть получены и методом вытягивания из расплава.

Важнейшим материалом лазерной техники является иттрий алюминиевый гранат, в кристаллической решётке которого часть ионов иттрия замещена ионами неодима (сокращенная форма записи YAG: Nd^{3+}). Низкая пороговая энергия возбуждения при комнатной температуре, высокая механическая прочность и хорошая теплопроводность дают возможность применять этот материал в лазерах, работающих в непрерывном и высокочастотном режимах.

Поскольку в спектре YAG: Nd^{3+} отсутствуют широкие полосы поглощения, то для увеличения эффективности оптической накачки обычно используют эффект сенсibilизации. В качестве сенсibilизатора вводят ионы Cr^{3+} . Энергия накачки, поглощенная в широких полосах сенсibilизирующего

иона Cr^{3+} , резонансным безызлучательным путём передается активным ионам Nd^{3+} . Сенсибилизация позволяет повысить коэффициент полезного действия до 5–7 % и довести мощность в непрерывном режиме генерации до сотен ватт.

По мощности излучения и значению коэффициента полезного действия лазеры $\text{YAG: Nd}^{3+} + \text{Cr}^{3+}$ конкурируют с мощными лазерами на углекислом газе, отличаясь от последних значительно меньшими габаритами и более удобной для практического применения длиной волны излучения.

В настоящее время для твердотельных лазеров широко используют гадолиний-галлиевые гранаты (GGG), а также гадолиний-скандий-галлиевые (GSGG) и иттрий-скандий-галлиевые (YSGG). Активирование осуществляют неодимом ($\lambda = 1,06$ мкм) или европием ($\lambda = 2,79$ мкм). Находят применение также другие высокотемпературные соединения: алюминаты (например YAlO_3), молибдаты (например $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$), вольфраматы (например шеелит CaWO_4), флюорит CaF_2 , а также оксидные и фторбериллатные стекла [1].

Лазеры находят применение в системах оптической локации, в телевидении, голографии, информационно-измерительной технике и в медицине. С их помощью осуществляется дальняя космическая связь. Широкое распространение получила лазерная обработка оптически непрозрачных материалов: импульсная сварка, плавление, пайка, отжиг, сверление отверстий, резание и др.

3.8 Жидкие кристаллы

Жидкими кристаллами (ЖК) называют вещества, молекулы которых обладают подвижностью при сохранении упорядоченной структуры [3]. Для них характерна зависимость оптических свойств от внешних факторов (температуры, давления, электрического поля и др.). Эта зависимость открывает богатые возможности при изготовлении индикаторных устройств различного назначения [1].

Жидкие кристаллы были открыты в 1888 г. австрийским ботаником Ф. Рейнитцером. Однако широкое практическое применение эти вещества нашли сравнительно недавно. Специфика ЖК заключается в ограниченном температурном интервале существования мезофазы (т.е. жидкокристаллического состояния).

Жидкокристаллическое состояние образуют в основном органические соединения с удлинённой палочкообразной формой молекул. Значительную часть ЖК составляют соединения ароматического ряда, т. е. соединения, молекулы которых содержат бензольные кольца. По признаку общей симметрии все жидкие кристаллы подразделяются на три вида [2]:

- смектические,
- нематические,
- холестерические.

Смектическая фаза отличается слоистым строением. Из-за высокой вязкости, смектические ЖК не нашли широкого применения.

В **нематической фазе** длинные оси молекул ориентированы вдоль одного общего направления, называемого **нематическим директором**. Для получения цветных изображений в ЖК вводят молекулы красителя, которые также имеют удлинённую палочкообразную форму. Область применения нематических

жидких кристаллов — индикаторные устройства. К таким устройствам относятся дисплеи, крупноформатные табло, цифровые индикаторы для микрокомпьютеров, циферблаты электронных часов и цифровых измерительных приборов. Основными преимуществами таких индикаторов являются: хороший контраст при ярком освещении; низкая потребляемая мощность; совместимость с интегральными схемами по рабочим параметрам и конструктивному исполнению; сравнительная простота изготовления и низкая стоимость.

Холестерическая фаза на молекулярном уровне похожа на нематическую. Однако вся её структура дополнительно закручена вокруг оси винта, перпендикулярной молекулярным осям. Шаг винтовой спирали сильно зависит от внешних воздействий. При увеличении температуры спираль развивается, увеличивается расстояние между молекулярными слоями и, соответственно длина волны отражаемого света, который смещается в красную область. Изменение цвета жидкого кристалла при изменении температуры называют термохромным эффектом.

В результате получается цветовой термометр, который нашел различные применения. С помощью жидкокристаллических индикаторов можно зарегистрировать изменения температуры в тысячные доли градуса. Цветовые термоиндикаторы с успехом применяются для целей технической и медицинской диагностики. Они позволяют очень просто получить цветовую картину теплового поля. Этот же принцип используется для визуализации инфракрасного излучения и полей СВЧ.

В жидких кристаллах для индикации используется окружающий свет, благодаря чему их потребляемая мощность значительно меньше, чем в других индикаторных устройствах, и составляет 10^{-4} – 10^{-6} Вт/см². Это на несколько порядков ниже, чем в светодиодах, порошковых и пленочных электролюминофорах и в газоразрядных индикаторах. Недостатками устройств на жидких кристаллах являются невысокое быстродействие [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гринченко, В. А. Конспект лекций по дисциплине «Электротехнические материалы» : учебное пособие для бакалавров очной формы обучения по направлению 35.03.06 – «Агроинженерия» (программа академического бакалавриата) / В. А. Гринченко. – Ставрополь : Бюро новостей, 2019. – 194 с.
2. Кекина О. В. Электротехнические материалы: Курс лекций: учебное пособие по дисциплине «Материаловедение» для специальности 180407 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»/ О.В.Кекина; ФГБОУ ВО «ВГАВТ» Управление СПО – Самарский речной техникум. – Самара, 2015.- 43 с.
3. Арзамасов, Б. В. Материаловедение: учебник для вузов / Б. В. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.- 655с.
4. Академик. Кельвин. : энциклопедический словарь. - URL.: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/es/78438> (дата обращения: 02.03. 2023). - Режим доступа: свободный. – Текст : электронный.
5. Серебренников В. В., Химия редкоземельных элементов, т. 1—2, Томск, 1959. – 61 с.
6. Ландсберг Г. С. Элементарный учебник физики. Т.2. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1985. - 479 с.
7. Образцова Маргарита. Редкоземельные элементы – стратегические металлы будущего / М. Образцова. – Москва: [б.и.], 2018. – URL.: <https://www.rough-polished.com/ru/analytics/127226.html> , свободный - (дата обращения: 05.03. 2023). - Режим доступа: свободный. – Текст : электронный. (ссылка не открывается)
8. Ионы. - Текст : электронный // Политехнический музей. : [сайт]. - URL.: <https://polytech.bm.digital/ontology/298003810121441280/ion> (дата обращения: 01.03. 2023). - Режим доступа: свободный.
9. Гутов Е.В. (отв. ред.) Энциклопедический словарь по истории и философии науки. Энциклопедический словарь. — Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2010. — 342 с.
10. Королёв, А.П. Материалы электроники и электротехники : учебное пособие / А. П. Королёв, С. Н. Баршутин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0940-1.
11. Разница между металлами и неметаллами. - Текст : электронный // The Difference : [сайт]. - URL.: <https://thedifference.ru/chem-metally-otlichayutsya-ot-nemetallor> (дата обращения: 20.03. 2023). - Режим доступа: свободный.
12. Химия : электронное приложение для повышенного уровня к учебному пособию «Химия» для 11 класса учреждений общего среднего образования с русским языком обучения. / под редакцией Т. Н. Воробьёвой. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2021. - URL.: <http://profil.adu.by/mod/book/view.php?id=5344&chapterid=17833> (дата обращения: 22.03. 2023). – Текст : электронный.
13. Что такое излучение? - Текст : электронный // IAEA : международное агентство по атомной энергетике : [сайт]. – URL.: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/chto-takoe-izluchenie> (дата обращения: 02.02. 2023).

14. Академик. Поликристаллы [Электронный ресурс] – / Академик – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc1p/37810> , свободный – (дата обращения: 02.01.2022)
15. Наше золото. Ситалл в ювелирных украшениях. Что это за камень? [Электронный ресурс] – / Наше золото. – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://www.ourgold.ru/blog/sitall>, свободный – (дата обращения: 02.03.2023)
16. VuzLit. Вентильный разрядник [Электронный ресурс] – / VuzLit – Электронные данные. Режим доступа: URL.: https://vuzlit.com/726539/ventilnyy_razryadnik – (дата обращения: 01.01.2023)
17. Studfile. 3.1.2. Токи смещения, абсорбции и сквозной проводимости [Электронный ресурс] – / Studfile – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://studfile.net/preview/745388/page:5> – (дата обращения: 02.01.2023)
18. Strephonsays. Разница между полярными и неполярными растворителями [Электронный ресурс] – / Strephonsays. – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://ru.strephonsays.com/polar-and-nonpolar-solvents-4761> (дата обращения: 02.04.2023)
19. ППГК. Целлюлоза – что это такое? [Электронный ресурс] – / ППГК – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://ppgk.ru/vopros-otvet/tsellyuloza-cto-eto-takoe> – (дата обращения: 01.23.2023)
20. StudFile / Сигнетозлектрики [Электронный ресурс] – / микроэлектроника – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://studfile.net/preview/4288124/page:26/> – (дата обращения: 02.03.2022)
21. Камни. Слюда: особенности минерала и свойства, способы добычи, применение [Электронный ресурс] – / Камни. – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://kamew.ru/podelochnye/slyuda-mineral.html>, – (дата обращения: 01.23.2023)
22. Большая Российская Энциклопедия. Газоразрядные приборы [Электронный ресурс] – / Большая Российская Энциклопедия – Электронные данные. Режим доступа: URL <https://bigenc.ru/c/gazorazriadnye-pribory-1a2c22> – (дата обращения: 01.15.2023)
23. Производитель. Что такое инертные газы и какова их область применения [Электронный ресурс] – / Производитель – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://www.products.pcc.eu/ru/blog/что-такое-инертные-газы-и-каковы-их-обл/> – (дата обращения: 03.03.2023)
24. Джаманбалин, К.К. Электротехнические материалы: учебник для студентов, обучающихся в высших учебных заведениях на инженерных специальностях/ К. К. Джаманбалин, О. В. Тарабаева. – Костанай, 2005. - 127 с.
25. Казанцев, А. П. Электротехнические материалы : учебное пособие для ПТУ/ А. П. Казанцев. – Минск: Дизайн ПРО, 2007.-96 с.
26. ПВХ Шторы. Поливинилхлорид (ПВХ), основные свойства и применение [Электронный ресурс] – / ПВХ Шторы – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://pvh-shtory.com.ua/blog/180-polivinilhlodid-svoystva-primenenie.html> – (дата обращения: 01.10.2023)

27. ПластЭксперт. ПЭТ/[Электронный ресурс] – / ПластЭксперт – Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://e-plastic.ru/spravochnik/materiali/pet> – (дата обращения: 03.01.2023)
28. Наука. Полиметилметакрилат [Электронный ресурс] – / Наука – Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://science.fandom.com/ru/wiki/Полиметилметакрилат> – (дата обращения: 02.03.2022) – (дата обращения: 01.02.2023)
29. TextileLife. Полиамид: что за материал, свойства и области применения [Электронный ресурс] – / TextileLife. — Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://textile.life/fabrics/synthetic-fibers/poliamid-cto-za-material-svojstva-i-oblasti-primeneniya.html> – (дата обращения: 11.02.2023)
30. МеталлСтрой. Поликарбонат — Виды и применение [Электронный ресурс] - / МеталлСтрой. – Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://metallstroy-mk.ru/news/polikarbonat-vidy-i-primenenie> – (дата обращения: 04.03.2023)
31. Технопарк. Что такое органическое стекло? [Электронный ресурс] - / Технопарк – Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://zavodstekol.ru/news/cto-takoe-organicheskoe-steklo/> – (дата обращения: 09.02.2023)
32. БИЗ. Гетинакс: определение, характеристики, области применения [Электронный ресурс] – / БИЗ – Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://biz-ural.ru/getinaks-opredelenie-harakteristiki-oblasti-primenenija> – (дата обращения: 23.01.2023)
33. Эверест. Виды текстолита, применение и свойства [Электронный ресурс] – / Эверест – Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://everest32.ru/articles/vidy-tekstolita-primenenie-i-svojstva> – (дата обращения: 12.03.2023)
34. Ecotermix. Полиуретановые эластомеры и все, что нужно о них знать [Электронный ресурс] – / Ecotermix – Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://ecotermix.ru/blog/elastomery-ih-osobennosti-i-svojstva> – (дата обращения: 06.02.2023)
35. Никулин, Н. В. Электроматериаловедение : учебник для ПТУ/ Н.В.Никулин. – 3-е изд., испр. и доп.-М.: Высшая. шк.,1989.- 192 с.
36. FB. Температура Кюри - это... Определение, особенности /– Электронные данные. Режим доступа: URL.:<https://fb.ru/article/431966/temperatura-kyuri---eto-opredelenie-osobennosti-i-formula> – (дата обращения: 25.01.2023). – Текст : электронный.
37. Иванов В. Н. Словарь-справочник по литейному производству. – М.: Машиностроение, 1990. - 384 с.
38. Суриков, В. С. Основы электродинамики. – М.: Протон. – 2000. - 186 с.
39. Электротехнические и конструкционные материалы : учебное пособие для СПО / В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, В. М. Матюхин [и др.]; под ред. В.А. Филиков.- М.: Академия, 2012.-280 с.

Учебное издание

Ломоносов Сергей Евгеньевич

ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛЫ

Учебно-методическое пособие

Часть 1

В авторской редакции

Изд. № 134/2023. Объем 4,5 п.л. Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 4,41.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»